

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra telekomunikační techniky**

**Vláknové elektrooptické modulátory**  
Fiber Electrooptical Modulators

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jan Hrnčárek**

Studijní program: N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2601T013 Telekomunikační technika

Téma: **Vláknové elektrooptické modulátory**  
**Fiber Electrooptical Modulators**

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte popis principu, realizace a aplikací elektrooptických modulátorů.
2. Navrhněte a realizujte měřicí pracoviště pro měření jejich statických a dynamických charakteristik.
3. U vybraných vzorků elektrooptických modulátorů proměřte jejich charakteristiky a parametry. Výsledky měření statisticky zpracujte.

Seznam doporučené odborné literatury:

HOBBS, Philips C.D. *Bulding Electrooptical Systems*. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2000. ISBN 0-471-24681-6.

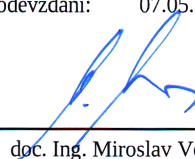
Vlastní literární rešerše k řešené problematice.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Zdeněk Tesář**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015

  
doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.  
vedoucí katedry




  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## Prohlášení studenta

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Vláknové elektrooptické modulátory“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Ostravě dne: 4.5.2015 .....

  
.....  
podpis

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Zdeňku Tesařovi za svůj věnovaný čas, ochotu, odbornou pomoc a v neposlední řadě také za mnoho cenných rad a připomínek při vypracovávání této práce. Dále bych chtěl poděkovat prof. RNDr. Vladimíru Vašínkovi, CSc. za množství cenných rad, které se týkaly problematiky tématu práce. A nesmím zapomenout také na rodinu a přátele, díky kterým jsme měli úžasné zázemí a velkou podporu pro dokončení práce a studia.



## **Abstrakt**

Cílem diplomové práce je návrh měřicího pracoviště pro měření statických a dynamických charakteristik elektrooptického intenzitního modulátoru. Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou návrhovou část. V teoretické části jsou shrnuty základní vlastnosti interference vlnění a světla. Na to navazují principy a konstrukce běžně používaných interferometrů. Další kapitola se týká popisu prvků využívaných pro interferometrii, což jsou koherentní zdroje záření a detektory světla. V následujících kapitolách práce jsou rozebrány vlastnosti a rozdělení modulátorů, podle čeho je dělíme, jakým způsobem lze modulovat optický signál a využití elektrooptického jevu při konstrukci elektrooptických modulátorů, jako je např. Mach-Zehnderův modulátor.

Praktická část pojednává o samotném návrhu, tedy zapojení modulátoru pro změření charakteristik. Jsou zde popsány měřicí komponenty, návrhy jednotlivých elektronických obvodů potřebné pro odměření jak statických, tak i dynamických charakteristik. Dále pak zjištění teplotní závislosti měřeného prvku, zda-li nedochází ke kolísání optického výkonu vlivem teploty, a jak moc je elektrooptický materiál náchylný na změnu teploty. Výsledné naměřené údaje jsou statisticky zpracovány, vyznačeny a zhodnoceny v grafech.

## **Klíčová slova**

Interference; interferometr; koherence; laser; fotodetektor; absorpce; emise; rezonátor; modulátor; elektrooptický jev; Pockelsův jev; Kerrův jev; anizotropní materiál; Mach-Zehnder;

## **Abstract**

The aim of the thesis is the design of measuring workplace for measuring static and dynamic characteristics of the electro-optical intensity modulator. The work is divided into theoretical and practical part. The theoretical part summarizes the basic characteristics of a light wave interference. Then principles and structures commonly used interferometers. Another chapter relates to description of the elements used for interferometry which are coherent light sources and light detectors. In the following chapters are discussed properties of modulators, how we can sorting them, how we can modulate an optical signal and utilization electrooptical effect for the design of electro-optical modulators, such as e.g. Mach-Zehnder modulator.

The practical part deals with the proposal itself, which means involvement modulator for measuring characteristics. There are described measuring components, design of electronic circuits required for measuring static and dynamic characteristics. Then finding the temperature dependence of the measured element, whether there is or not a variation in optical performance due to temperature, and how much electro-optical material which is susceptible to temperature changes. The resulting measurement data are statistically processed, marked and evaluated in graphs.

## **Key words**

Interference; interferometer; coherence; laser; photodetector; absorption; emissions; resonator; modulator; electro-optical effect; Pockels effect; Kerr effect; anisotropic material; Mach-Zehnder;

## Seznam použitých symbolů, zkratek a termínů

A	Amplituda
APD	Avalanche photo detector
B	Magnetická indukce
c	Rychlost světla ve vakuu
D	Elektrická indukce
DBR	Distributed Bragg reflector
DFB	Distributed feedback laser
E	Elektrická intenzita
F	Činitel jemnosti (coefficient of finesse)
f	Frekvence
FBG	Fiber Bragg grating
FEC	Forward error correction
G	Činitel kvality
H	Magnetická intenzita
h	Planckova konstanta
I	Intenzita záření nebo elektrický proud (popsáno v textu)
K	Ionizační koeficient
L	Délka (dráha)
M	Multiplikační faktor
n	Index lomu
P	Výkon optického záření
PPLN	Periodically poled lithium niobate
PPLT	Periodically poled lithium tantalat
q	Náboj elektronu
R	Citlivost fotodetektoru (v ojedinělém případě Odrazivost záření)
r	Pockelsův koeficient
$r_{ij}$	Elektrooptický koeficient
s	Kerrův koeficient
SNR	Signal to noise ratio
T	Perioda (v ojedinělém případě Propustnost záření)
U	Elektrické napětí
V	Viditelnost interference
$W_a$	Šířka lavinové oblasti
$\beta$	Konstanta šíření
$\Gamma$	Fázové zpomalení
$\varepsilon$	Dielektrický tenzor permitivity
$\eta$	Kvantová účinnost
$\eta_M$	Modulační index
$\Delta\eta$	Koeficient úměrnosti
$\lambda$	Vlnová délka
$\varphi$	Fáze
$\omega$	Úhlová frekvence

# Obsah

1 Úvod.....	1
2 Interference.....	2
2.1 Interference vlnění.....	2
2.2 Interference světla.....	3
2.2.1 Youngův experiment.....	5
3 Interferometry.....	7
3.1 Michelsonův interferometr.....	8
3.2 Mach-Zehnderův interferometr.....	10
3.3 Sagnacův interferometr.....	11
3.4 Fabry-Perotův interferometr.....	12
4 Zdroje a detekce koherentního záření.....	15
4.1 Laserové diody.....	15
4.1.1 Absorpce záření.....	15
4.1.2 Stimulovaná emise záření.....	16
4.1.3 Inverze populace.....	17
4.1.4 Optické rezonátory.....	17
4.2 Fotodetektory.....	19
4.2.1 PIN fotodioda.....	20
4.2.2 APD fotodioda.....	20
5 Modulátory a přepínače.....	23
5.1 Základní vlastnosti modulátorů a přepínačů.....	24
5.1.1 Modulační hloubka.....	24
5.1.2 Šířka pásma.....	25
5.1.3 Vložné ztráty.....	25
5.1.4 Výkonová spotřeba.....	26
5.2 Elektrooptický jev.....	26
5.2.1 Anizotropní materiály (krystaly).....	26
5.2.2 Pockelsovy a Kerrovy koeficienty.....	30
5.2.3 Pockelsův a Kerrův jev.....	30
5.3 Elektrooptické modulátory.....	32
5.3.1 Fázové modulátory.....	33
5.3.2 Polarizační modulátory.....	36
5.3.3 Intenzitní (amplitudové) modulátory.....	38
6 Statické a dynamické charakteristiky.....	41
6.1 Základní komponenty měření.....	41
6.1.1 Mach-Zehnderův modulátor.....	41
6.1.2 DFB laserová dioda.....	43
6.1.3 Izolátor.....	44

6.1.4 Zdroj stejnosměrného napětí.....	45
6.1.5 Optický měřič výkonu.....	45
6.1.6 Signálový generátor s osciloskopem.....	46
6.2 Měření statických charakteristik.....	46
6.2.1 Návrh obvodu pro plynulou regulaci napětí.....	47
6.2.2 Návrh obvodu pro fotodetektor.....	49
6.2.3 Odměření statické charakteristiky.....	51
6.2.4 Teplotní závislost.....	54
6.3 Měření dynamických charakteristik.....	57
6.3.1 Frekvenční závislost.....	58
6.3.2 Závislost nastaveného pracovního bodu na tvar modulovaného signálu.....	61
6.3.3 Teplotní závislost.....	64
7 Závěr.....	66
8 Seznam použité literatury.....	68
9 Seznam obrázků.....	70
10 Přílohy.....	1

# 1 Úvod

Tématem diplomové práce, a cílem řešení, je kompletní návrh měřicího pracoviště pro změření statických a dynamických charakteristik elektrooptického intenzitního modulátoru. Statickými charakteristikami se myslí závislost výstupního optického výkonu na elektrickém poli (napětí) přiloženém na elektrooptickém krystalu modulujícího zařízení. U dynamických charakteristik budeme sledovat závislost změny výstupního signálu na změny frekvence přivedené na modulátor. Dále budeme zkoumat teplotní závislost modulátoru, tj. vlastnosti elektrooptického krystalu na změny teploty.

Diplomová práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. První kapitola je úvodní kapitola, kde je uveden úvod do problému, cíle diplomové práce a popis obsahu jednotlivých částí. Druhá kapitola se zabývá interferencí vlnění a interferencí světla. Dozvíme se, jaké jsou předpoklady a podmínky pro vznik interference, kde je mimo jiné zmíněn i tzv. Youngův pokus, který má za následek vznik interferenčního obrazce. Třetí kapitola se zaměřuje na interferometri, tzn. zařízení u kterých využíváme interferenci. Řeč bude o Michelsonově, Mach-Zehnderově, Sagnacovu a Fabry-Perotovému interferometru. Ve čtvrté kapitole jsou zmíněny zdroje a detektory koherentního záření, tedy co je potřeba pro vznik koherentního záření a jakým způsobem toto záření detekovat pomocí polovodičových diod. Pátá kapitola je, co se teorie týká, nejpodstatnější kapitola celé práce. Budou zde popsány vlastnosti modulátorů a přepínačů. V této části se také zaměříme na elektrooptický jev, ať už lineární (Pockelsův) nebo nelineární (Kerrův). Dále pak rozebereme vlastnosti anizotropních materiálů, což jsou materiály vhodné právě pro elektrooptické modulátory, jejich vliv na přiložené elektrické pole apod. Poslední částí této kapitoly bude podrobný popis základních typů elektrooptických modulátorů (fázových, polarizačních a intenzitních).

Šestou kapitolu můžeme považovat za kapitolu návrhovou, kde popíšeme všechny měřicí komponenty a zařízení. Dále pak zde bude navrženo pracoviště pro měření statických a dynamických charakteristik, včetně elektronických obvodů pro regulaci stejnosměrného napětí přiváděného na modulátor, a také obvodu pro detekci napětí z integrovaného fotodetektoru. V neposlední řadě zde budou uvedeny všechny měření, tabulky, grafy a průběhy.

Kapitoly sedm a osm jsou předposledními částmi práce, kde jsou závěrem shrnuty naměřené výsledky a zhodnocení práce, dále pak použité literární prameny a zdroje. Za těmito kapitolami ještě následují přílohy, které se týkají tabulek, grafů a průběhů výstupních napětí (resp. výkonů).

## 2 Interference

Abychom mohli plně porozumět principům interferometrů a modulátorů, je třeba si před samotným výkladem něco povědět o základních pojmech, které jsou pro plné pochopení této diplomové práce potřeba. Prvním takovým pojmem je interference vlnění.

### 2.1 Interference vlnění

Interference vlnění je děj, při němž se v určitém bodě prostředí, kterým se šíří vlnění, skládají okamžité výchylky dvou a více vln. Tyto vlny pocházejí z různých výchozích bodů (zdrojů), přitom však platí princip nezávislosti šíření vlnění, kdy každé vlnění se šíří v celém pružném prostředí tak, jako by v daném prostředí jiná vlnění neexistovala. Interferenční jevy můžeme sledovat všude tam, kde dochází k šíření vlnění, ať už mechanického rázu, akustického nebo elektromagnetického (světlo).

Příkladem může být vodní hladina na kterou dopadnou dva kameny. Dopad kamenů způsobí rozkmitání hladiny ze dvou různých zdrojů kmitů. Z těchto zdrojů vycházejí vlny, které se šíří v kruhových vlnoplochách. Ty se vzájemně překrývají, ale při svém pohybu se neovlivňují. Uplatňuje se zde tzv. princip superpozice, kdy mají amplitudy v místě překryvu různou velikost a výsledné kmitání je dáno vektorovým součtem jednotlivých kmitů. Jednoduše řečeno, pokud se setkají vlny se stejnou fází dojde k zesílení amplitudy (interferenční maximum), a pokud se setkají vlny s fází opačnou, dojde v tomto místě k zeslabení amplitudy (interferenční minimum).[1]

Obecně jsou interferenční jevy velmi složité. Proto si zavedeme pojem, tzv. koherentní vlny. Tyto vlny o amplitudě  $A$  mají stejnou periodu  $T$ , vlnovou délku  $\lambda$ , stejný směr kmitání, šíří se stejnou rychlostí a mají konstantní fázový rozdíl. Jejich rovnice můžou vypadat následovně:

$$u_1 = A_1 \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda} \right) = A_1 \sin \left( 2\pi \frac{t}{T} - 2\pi \frac{x_1}{\lambda} \right) \quad (2.1)$$

a

$$u_2 = A_2 \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x_2}{\lambda} \right) = A_2 \sin \left( 2\pi \frac{t}{T} - 2\pi \frac{x_2}{\lambda} \right), \quad (2.2)$$

kde  $\varphi_1 = 2\pi \frac{x_1}{\lambda}$  je fázový posun prvního vlnění a  $\varphi_2 = 2\pi \frac{x_2}{\lambda}$  je fázový posun druhého vlnění.

Amplituda výsledného kmitu je podle teorie skládání stejnosměrného kmitání dána jako

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1)} \quad (2.3)$$

a fázový rozdíl  $\Delta\varphi$  je úměrný dráhovému rozdílu

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = 2\frac{\pi}{\lambda}(x_2 - x_1). \quad (2.4)$$

Jak už bylo zmíněno výše, mohou nastat dva mezní stavy interference. Prvním mezním stavem je, když interagují vlny se stejnou fází. Jestliže

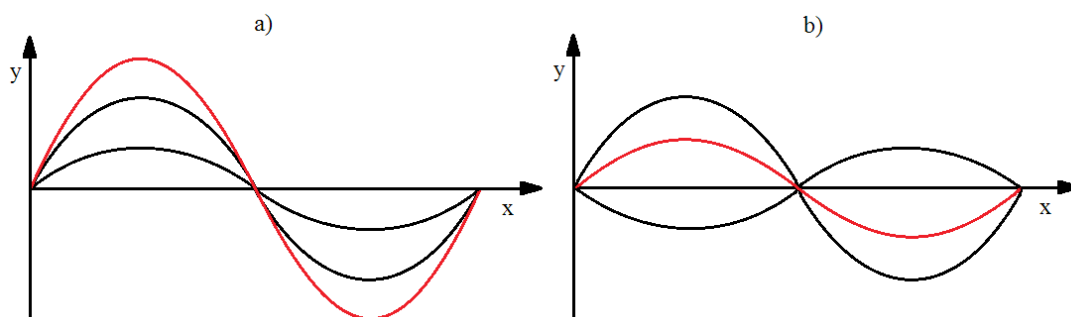
$$x_2 - x_1 = 2k\frac{\lambda}{2} \text{ pak } \Delta\varphi = 2k\pi, \text{ kde } k = 0, 1, 2, 3, \dots, \quad (2.5)$$

tak hovoříme o interferenčním maximu (obrázek 2.1 a). Výsledná amplituda je dána součtem amplitud  $A = A_1 + A_2$ .

Druhým mezním stavem je stav, kdy se vlny setkávají v protifázi. Jestliže

$$x_2 - x_1 = (2k+1)\frac{\lambda}{2} \text{ pak } \Delta\varphi = (2k+1)\pi, \text{ kde } k = 0, 1, 2, 3, \dots, \quad (2.6)$$

tak hovoříme o interferenčním minimu (obrázek 2.1 b). Výsledná amplituda se spočte jako rozdíl amplitud  $A = A_1 - A_2$ . Pokud by nastal případ, že by amplitudy obou vln měly stejnou velikost, došlo by k vyrušení těchto vln.[2]



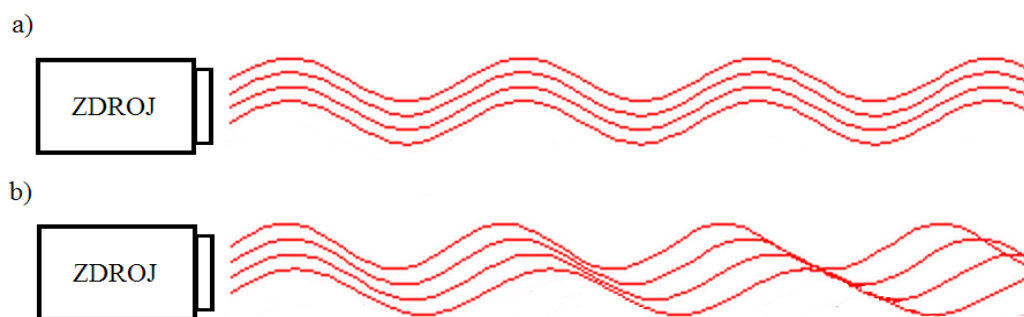
Obrázek 2.1: Skládání vln: a) ve fázi, b) v protifázi

## 2.2 Interference světla

V předcházející části jsme uvedli základní poznatky týkajících se interference vlnění a skládání vln. Nyní se zaměříme na interferenci optického záření (světla). Víme, že světlo je elektromagnetické vlnění tvořené vzájemně podmíněnými časovými změnami intenzity elektrického a magnetického pole šířícími se v prostoru. Interferencí světla tedy myslíme skládání dvou a více elektromagnetických vln, kdy sčítáme okamžité hodnoty elektrických a magnetických složek.



Abychom mohli trvale sledovat interferenci optického záření je nutné, aby toto záření bylo koherentní. Koherentní záření jsou taková záření, která mají stejnou frekvenci a jejich fázový rozdíl se v daném bodě s časem nemění (obrázek 2.2 a). Proto u běžných světelných zdrojů, jako jsou žárovky, oheň, slunce atd., nemůžeme interferenci pozorovat. Je to dáno tím, že doba po kterou lze považovat fázový rozdíl světelných vlnění za konstantní je velmi krátká (obrázek 2.2 b). [3]



Obrázek 2.2: Optické záření: a) koherentní, b) nekoherentní

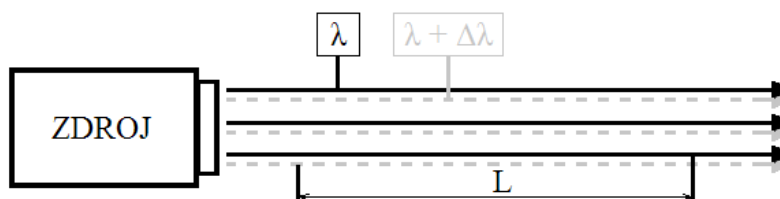
Koherenci záření u konvenčních zdrojů je nutné posuzovat podle časové a prostorové stability záření. Proto zavádíme pojmy jako časová a prostorová podmínka koherence.

#### Časová podmínka koherence

Časová koherence nám charakterizuje korelace vlny ve dvou různých časech. Jinak řečeno, jak dobře vlna interferuje sama se sebou. Je vyjádřena tzv. koherentním časem, či koherentní délkou bodového zdroje světla. Takový zdroj záření by měl v každém okamžiku a z celého povrchu vyzařovat monochromatické záření. To znamená, že šířka spektrální čáry je konečná a jeho vlnová délka leží v intervalu  $\lambda + \Delta\lambda$ . Pak tedy bude docházet při interferenci paprsků o vlnové délce  $\lambda$  s paprsky o vlnové délce  $\lambda + \Delta\lambda$  k zánějům ve směru šíření záření (obrázek 2.3). Vzdálenost zánějů označujeme právě jako koherentní délku  $L$ . Tato délka vyjadřuje schopnost zdroje generovat stacionární záření se stálou fází ve sledovaném bodě. Platí níže uvedený vztah

$$L = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} = \frac{c}{\Delta f} \quad , \quad (2.7)$$

kde  $c$  je rychlost šíření záření a  $\Delta f$  je změna frekvence zdroje vyzařujícího v intervalu vlnových délek  $\lambda + \Delta\lambda$ . [4]



Obrázek 2.3: Časová koherence

### Prostorová podmínka koherence

Prostorová koherence udává korelace vlny ve dvou různých místech. Parametrem této koherence je koherentní plocha, což je plocha na které pozorujeme interferenci. Prostorovou koherenci můžeme vyjádřit také pomocí tzv. koherentní šířky. To je vzdálenost ( $R$ ) mezi osou svazku a místem, kde dochází při interferenci paprsků šířících se od okraje monochromatického zdroje k minimální intenzitě. Koherentní šířka je především funkcí příčné velikosti zdroje ( $d = 2r$ ), vlnové délky  $\lambda$  a mění se se vzdáleností ( $a$ ) stínítka od zdroje (obrázek 2.4). Dostáváme vztah

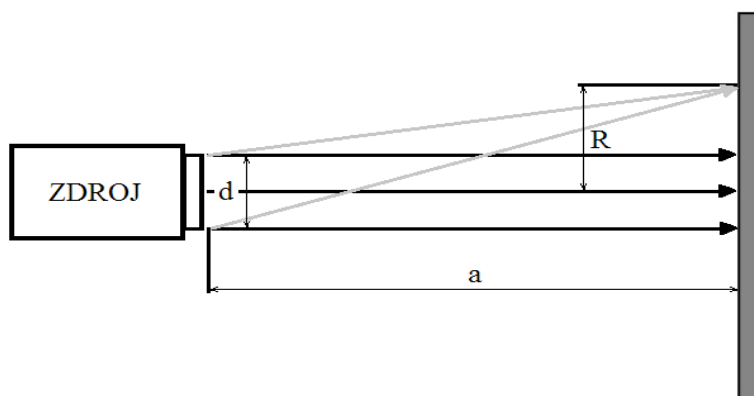
$$\frac{\lambda}{2} = \sqrt{a^2 + (R+r)^2} - \sqrt{a^2 + (R-r)^2}, \quad (2.8)$$

který můžeme zjednodušit, jelikož vzdálenost stínítka od zdroje je podstatně větší než příčná velikost zdroje  $d$ . Po úpravě dostáváme tedy vzorec

$$\frac{\lambda}{2} = \left[ a + \frac{(R+r)^2}{2a} \right] - \left[ a + \frac{(R-r)^2}{2a} \right] \quad (2.9)$$

a po vyjádření vzdálenosti  $R$  získáme jednoduchou rovnici

$$R = a \frac{\lambda}{4r}. \quad (2.10)$$



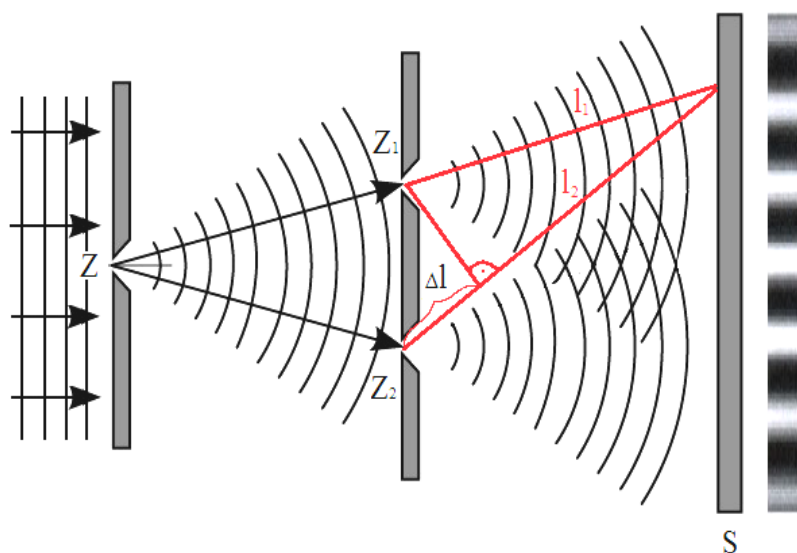
*Obrázek 2.4: Prostorová koherence*

Velké hodnoty koherentní šířky je možné dosáhnout především u laserů. Tyto zdroje záření mají příčnou velikost zdroje  $d$  oproti jiným zdrojům záření zanedbatelnou. Z toho důvodu můžeme lasery považovat prakticky za bodové zdroje záření.[4]

#### **2.2.1 Youngův experiment**

Také nazývaný dvouštěrbínový experiment, kterým v roce 1801 britský lékař a fyzik Thomas Young dokázal, že se světlo mimo jiné chová i jako vlnění. Tímto pokusem prokázal vzájemnou interferenci rovnoběžného monochromatického záření, které dopadá na štěrbinu Z. Tato štěrbina se

chová jako bodový zdroj světla. Světlo z tohoto zdroje se bude šířit dál do prostoru, než narazí na další překážku, kde se nachází dvě štěrbin (blízko sebe ležící) označené jako  $Z_1$  a  $Z_2$ . Z těchto dvou bodových zdrojů kmitají světelné vlny, které jsou ve fázi (jejich dráhový rozdíl je násobkem vlnových délek). Světlo z obou zdrojů interferuje a na stínítku S umístěném za štěrbinami se vytváří interferenční obrazec (obrázek 2.4).



*Obrázek 2.5: Interference optického záření (Youngův experiment)*

O tom, jestli na stínítku vznikne světlý proužek nebo tmavý proužek, rozhoduje dráhový rozdíl  $\Delta l$  drah  $l_1$  a  $l_2$  paprsků dopadajících do téhož bodu. Je-li dráhový rozdíl  $\Delta l$  roven sudému násobku poloviny vlnové délky, pak na stínítku vzniká světlý proužek a říkáme, že nastává interferenční maximum (platí podmínka 2.5). Pokud je naopak dráhový rozdíl roven lichému násobku poloviny vlnové délky, pak na stínítku vzniká tmavý proužek a říkáme, že nastává interferenční minimum (platí podmínka 2.6). [5]

### 3 Interferometry

V minulé kapitole jsme si pověděli něco o základních principech interference vlnění a světla. V této kapitole se zaměříme na praktickém využití těchto jevů.

Optický interferometr je prostředek, využívající se pro velmi přesná měření, který porovnává fázové rozdíly mezi dvěma nebo vícero koherentních optických svazků, jež uběhly stejné dráhy. Tyto rozdíly se projeví jako změny intenzity světla. Pro ukázkou si uveďme příklad, kdy koherentní světelný svazek je rozdělený do dvou cest. Jedna cesta obsahuje tzv. referenční rameno, které je netečné vůči okolním změnám, zatímco druhé rameno je citlivé na tyto změny. Velikost změn se projeví na změně fáze vlny  $\varphi$  (3.1). Jakmile dojde k opětovnému sloučení obou cest, dojde také k periodické změně intenzity světelného svazku, která je dána fázovým rozdílem s periodou  $2\pi$ .

$$\varphi = 2\pi L \frac{n}{\lambda}, \quad (3.1)$$

kde  $L$  je délka dráhy,  $n$  je index lomu a  $\lambda$  je vlnová délka.

Interferometry mají široké využití v různých aplikacích jako je měření délek (interferenční komparátory), měření indexů lomu různých látek (interferenční refraktometry) nebo pro určení jemné struktury spektrálních čar (interferenční spektroskopy).

Interferometry můžeme rozdělit na lineární a nelineární. Lineární jsou taková optická zařízení, která rozdělují základní vlnu na dvě vlny. Tyto vlny jsou v interferometru rozděleny, je měněn jejich směr, jsou fázově zpoždovány a následně opět sloučeny. Detekuje se jejich intenzita záření při jejich superpozici. Nelineární zařízení jsou taková, která při fázovém zpoždování využívají optické nelineární jevy, např. závislost indexu lomu  $n = f(I)$  na intenzitě záření  $I$ .

Podle konstrukce můžeme vláknově optické interferometry také rozdělit do tří základních skupin:

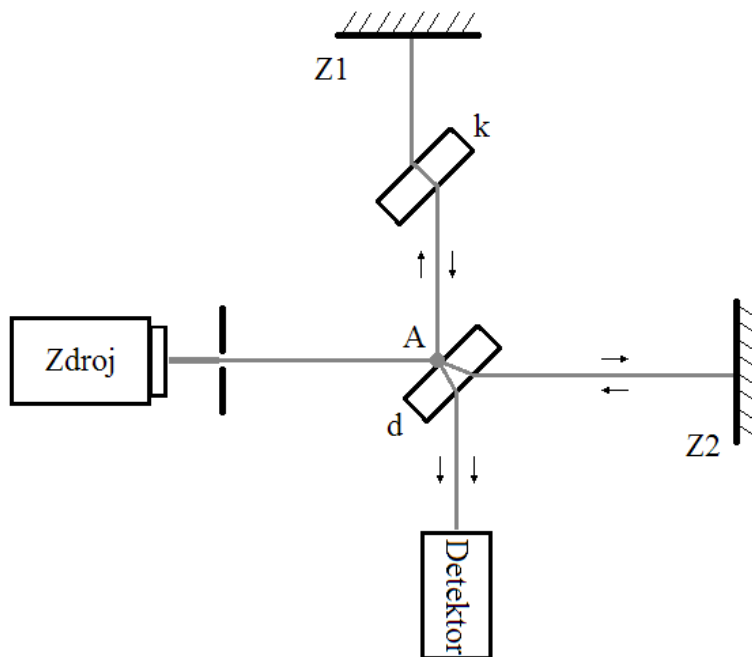
1) Dvojramenný jednovidový interferometr – porovnává fáze světelné vlny, která se šíří senzorovým optickým vláknem a vlny, která se šíří referenčním optickým vláknem. Využívá se zde homodynního nebo heterodynního způsobu detekce vlny.

2) Jednovláknový interferometr - využívá obousměrnou optickou vazbu porovnávající fázi dvou světelných vln, které se šíří proti sobě v cívce optického vlákna.

3) Mezividový interferometr - využívá interferenci dvou a nebo více vidů světelné vlny, která se šíří stejným optickým vláknem. Výhodou je možnost použití vícevidových optických vláken, nevýhodou pak bývají problémy při vyhodnocování interferenčního obrazu.[6]

### 3.1 Michelsonův interferometr

Michelsonův interferometr navrhl a sestavil v roce 1881 americký fyzik Albert Abraham Michelson (narozen 19. prosince 1852 v Pasedeně). V průběhu let docházelo k jeho mírným úpravám, kdy pomocí tohoto zařízení byla v roce 1887 dokázána existence světelného éteru. Původní schéma je naznačeno na obrázku 3.1.



Obrázek 3.1: Michelsonův interferometr

Ze světelného zdroje (tehdy rtuťová žárovka, dnes nahrazena laserovým zdrojem) vychází optický svazek, který dopadá do bodu A na planární destičku d pod úhlem 45°. V tomto bodě se odráží i láme. Odražené paprsky se přes kompenzační destičku k (zajišťuje stejnou dráhu pro odražené i lomené paprsky) dostanou kolmo k zrcadlu Z1, které je odrazí zpět do bodu A. Z tohoto bodu jsou přes planární destičku posílány do detektoru. Lomené paprsky se přes planární destičku d dostávají kolmo na zrcadlo Z2, které je odrazí zpět do bodu A, odkud se dostanou rovněž k detektoru. Důležitými parametry jsou vzdálenosti obou zrcadel Z1 a Z2 od bodu A. Regulace a změny těchto vzdáleností mění výsledný obraz na detektoru (tvoří se interferenční maxima a minima).

Jak již bylo zmíněno, na detektor přicházejí jak paprsky odražené od zrcadla Z1, tak také paprsky odražené od zrcadla Z2, které se vektorově sčítají. Výsledná intenzita je úměrná kvadrátu elektrické složky výsledného pole, které vzniká interferencí paprsků odražených od obou zrcadel. Pokud předpokládáme, že dopadající světlo o úhlové frekvenci  $\omega$  je koherentní, lineárně polarizované ve stejné rovině a dojde k úplnému odrazu, pak platí pro sčítání obou vln

$$\vec{E}(j\omega) = \vec{E}_1(j\omega) + \vec{E}_2(j\omega) = |\vec{E}_1(j\omega)| e^{-j(\beta L_1 + \varphi)} + |\vec{E}_2(j\omega)| e^{-j(\beta L_2 + \varphi)}, \quad (3.2)$$

kde  $L_1$  a  $L_2$  jsou dráhy paprsků dány koncovými body (zdroj – místo interference) a  $\beta$  je konstanta šíření o vlnové délce  $\lambda$  daná vztahem

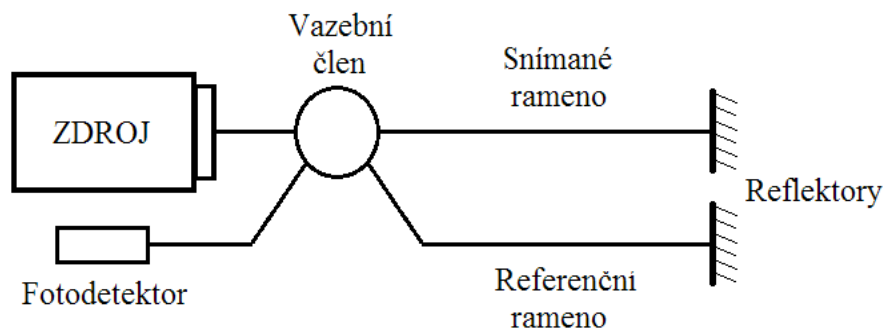
$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} . \quad (3.3)$$

Pro fázový rozdíl  $\varphi$  mezi vektory  $E_1$  a  $E_2$  platí

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} 2\Delta L = \frac{4\pi}{\lambda} (L_2 - L_1) . \quad (3.4)$$

Více o Michelsonově interferometru můžeme najít v [7].

Michelsonův interferometr můžeme využít i pro vláknově optické aplikace. Princip je velmi obdobný (obrázek 3.2), kdy snímané a referenční rameno je zakončeno reflektory (zrcadly). Procházející světelný svazek, který je vazebním členem rozdělený do obou ramen, se odrazí od zrcadel a je poslán zpět do vazebního členu.



Obrázek 3.2: Michelsonův optický interferometr

Výhodou použití dvojitého průchodu signálu stejnými vlákny je větší citlivost interferometru. Nicméně přímé spojení výstupu s laserovým zdrojem způsobuje jeho nestabilitu. Proto se z praktického hlediska umísťuje mezi zdroj a vazební člen tzv. optický izolátor což je prvek, který brání průchodu optického signálu pouze v jednom směru.

Principem izolátoru je vstupní polarizátor, který propouští pouze lineárně polarizované světlo do Faradayova rotátoru. Ten vlivem působení magnetického pole natáčí rovinu lineárně polarizovaného světla o  $45^\circ$ . Směr rotace je závislý na směru rotace magnetického pole. Po otočení světlo pak naráží na další výstupní polarizátor. Jakmile se světlo vrací zpět, dochází k opětovnému pootočení roviny o dalších  $45^\circ$ . V této chvíli má světelný paprsek polarizaci kolmou k rovině polarizace vstupního polarizátoru a při dopadu na tento polarizátor již neprojde zpět k laseru.[8]

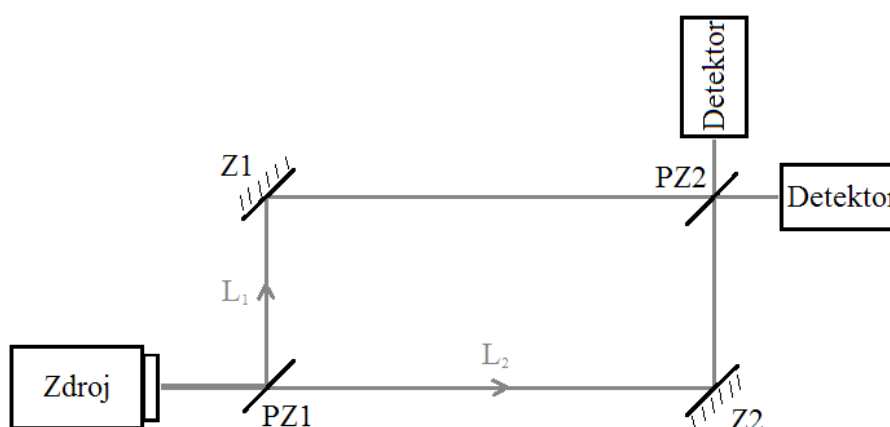
V praxi se Michelsonův interferometr využívá např. pro snímání fyzikálních veličin, které způsobují změnu odrazových vlastností konce snímaného optického vlákna. Dále jimi můžeme na

základě Dopplerova jevu měřit rychlost pohybujících se částic (horké a agresivní plyny, kapaliny na těžko dostupných místech, průtok krve v žilách apod).

### 3.2 Mach-Zehnderův interferometr

Mach-Zehnderův interferometr byl vyvinut v letech 1891 – 1892 rakouským teoretickým fyzikem Ernstem Machem (narozen 18.2. 1838 v Chrlicích u Brna), jeho synem Ludwigem Machem a nezávislým švýcarským kolegou Ludwigem Zehnderem. Principem tohoto interferometru jsou dvě polopropustná zrcadla a dvě obyčejná (plně odrazná) zrcadla (obrázek 3.3). Světelný zdroj vysílá paprsek, který naráží na polopropustné zrcadlo PZ1. To jej rozdělí v poměru 50:50 do dvou větví (ramen) o délkách  $L_1$  a  $L_2$ . Pomocí optických prvků v obou ramenech můžeme ovlivňovat parametry procházejících svazků, jako jsou optická intenzita, polarizace nebo fáze. Po průchodu svazku oběma rameny se světlo dostává k druhému polopropustnému zrcadlu PZ2, kde dochází k interferenci, která je závislá na fázovém rozdílu  $\varphi$ , kde

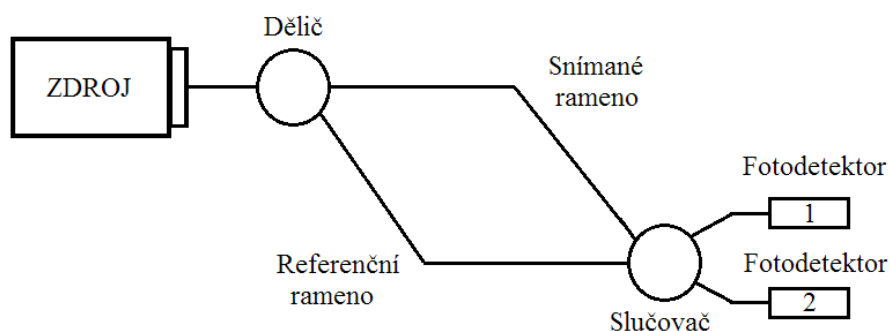
$$\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} (L_2 - L_1) . \quad (3.5)$$



Obrázek 3.3: Mach-Zehnderův interferometr

Velice obdobným způsobem, avšak bez použití zrcadel, můžeme realizovat Mach-Zehnderův interferometr využívající optická SM (jednomódová) vlákna. Takovýto optický interferometr (obrázek 3.4) je jedním ze základních typů interferometrů využívaných v mnoha aplikacích. Řadíme jej mezi dvojramenné jednovidové interferometry.

Zdrojem světla je laser, který pracuje s videm  $TEM_{00}$ . Ten je děličem (splitter) rozdělený v přesném poměru do tzv. referenčního ramena a snímaného ramena. Ve snímaném ramenu je optický svazek upravován (mění se jeho fáze), zatímco v referenčním ramenu zůstává naprosto stejný. Po průchodu rameny je světelný paprsek ve slučovacím prvku sloučen a fotodetektor, popř. systém detektorů registruje signál, který vzniká následkem interference optických paprsků z obou ramen.



Obrázek 3.4: Mach-Zehnderův optický interferometr

Výstupem z fotodetektorů je pak elektrický proud úměrný dopadajícímu záření

$$I_1 = I_0 [1 - V \cos(\varphi_a - \varphi_b)] \quad (3.6)$$

a

$$I_2 = I_0 [1 + V \cos(\varphi_a - \varphi_b)], \quad (3.7)$$

kde  $\varphi_a$  a  $\varphi_b$  jsou fáze světelného paprsku snímaného a referenčního ramena,  $I_0$  je střední hodnota signálu a  $V$  je tzv. viditelnost interference. Viditelnost závisí na poměrné intenzitě světelného svazku z obou ramen, jejich polarizačních stavech a vzájemné koherenci. V ideálním případě jsou poměrné intenzity a jejich polarizační stavy sobě rovny a rozdíl délky optické dráhy obou ramen je mnohem menší, než koherentní délka detekovaného světla. Z praktického hlediska může viditelnost nabývat hodnoty od nuly do jedné v závislosti na fázovém posuvu světla z obou ramen. Toho můžeme využít při modulacích, kdy regulujeme výstupní intenzitu světelného zdroje.

Jednou z nevýhod Mach-Zehnderova interferometru a vůbec systémů založených na dvojramenném principu je složitější výroba, při které se klade důraz na kvalitu vazebních prvků. To vše se projeví samozřejmě i na ceně. Další nevýhodou je nutnost použít jednovidová vlákna a často bývají problémy s odstraněním interference různých fyzikálních veličin (např. tlaku, teploty, magnetického pole, apod.). Mach-Zehnderův interferometr není tak citlivý jako Michelsonův interferometr, u kterého prochází předmětový svazek měřeným prostorem dvakrát.[6][8]

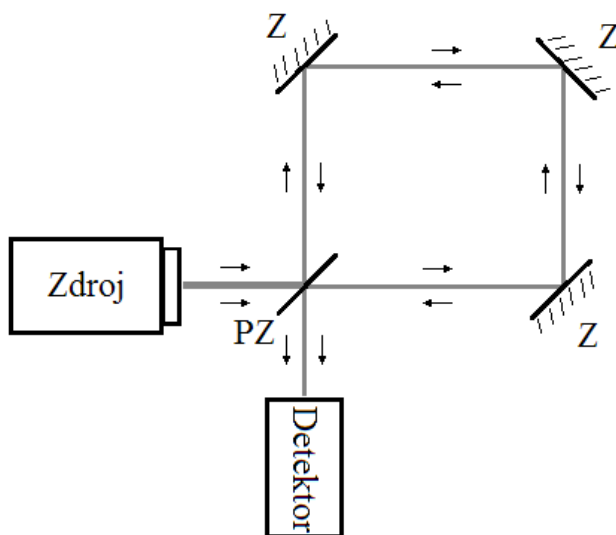
### 3.3 Sagnacův interferometr

Sagnacův interferometr byl výsledkem práce francouzského fyzika Georsege Sagnaca (narozen 14. října 1869 v Périgueux ve Francii), který s ním přišel v roce 1913. Hlavní myšlenkou tohoto interferometru je využití elektromagnetických vln šířících se proti sobě (obrázek 3.5).

Světelný paprsek jdoucí ze zdroje dopadne na polopropustné zrcadlo PZ. To jej rozdělí na dva svazky. V obou svazcích se elektromagnetická vlna šíří po uzavřené dráze, avšak jedna část ve směru hodinových ručiček a druhá v protisměru. Pokud mají dráhy stejnou velikost, tak spolu oba svazky



interferují ve fázi. Pokud je však prostředím tvořícím dráhu interferometru otáčeno určitou rychlostí, je díky relativistickému skládání rychlostí různá rychlost šíření svazků ve směru a v protisměru otáčení. Výsledkem je detekovatelný fázový posuv  $\varphi$  na výstupu z interferometru.



Obrázek 3.5: Sagnacův interferometr

$$\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{4\pi L r}{c\lambda} \omega, \quad (3.8)$$

kde  $L$  je celková dráha interferometru,  $r$  je poloměr cívky,  $c$  je rychlost světla ve vakuu,  $\omega$  je úhlová rychlost otáčení a  $\lambda$  je vlnová délka záření.

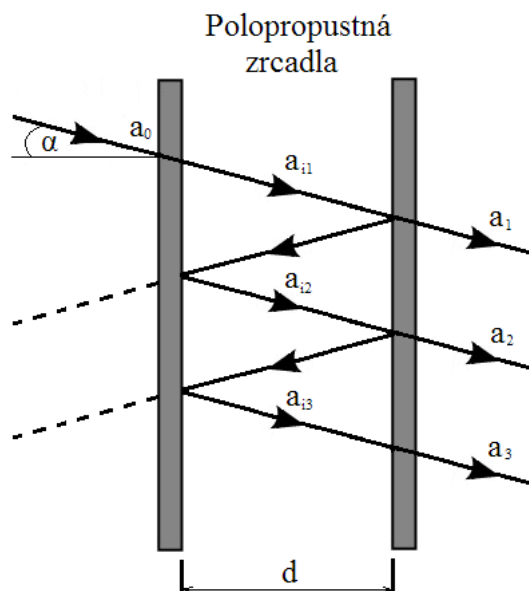
Užitím Sagnacova interferometru jsme schopni sestavit senzor úhlové rychlosti (optický vláknový gyroskop), kde se optická dráha realizuje pomocí optických vláken. Na rozdíl od mechanických gyroskopů, založených na setrvačných vlastnostech hmoty, jsou zde vyloučeny vlivy setrvačnosti, tření, vyšší odolnost ke změnám teploty, zrychlení, vibracím a jsou zde nižší energetické nároky na provoz, hmotnost i rozměry. Optický gyroskop má také nižší dobu uvedení do provozu a vyšší spolehlivost a životnost.[9]

### 3.4 Fabry-Perotův interferometr

První Fabry-Perotův interferometr se poprvé objevil v devadesátých letech 19. století. O jeho vznik se postarali francouzští fyzici Charles Fabry a Alfred Perot. Původní interferometr se skládal ze dvou planoparalelních destiček, jejichž vnitřní vrstvy byly vysoce odrazné. Díky tomu měl přístroj vynikající rozlišovací schopnost a našel tak celou řadu uplatnění, zejména ve spektroskopii.

Fabry-Perotův interferometr (rezonátor) patří mezi mnohosvazkové interferometry. Jsou tvořeny vzduchovou vrstvou, uzavřenou mezi dvěma polopropustnými zrcadly, jejichž vnitřní stěny

jsou přesně rovinné. Tyto desky jsou mírně klínovité, aby se zabránilo vzniku interferencí mezi vnějšími plochami (obrázek 3.6).



Obrázek 3.6: Fabry-Perotův interferometr

Základním principem je světelná vlna, která vstupuje do interferometru pod vstupním úhlem  $\alpha$  a amplitudě  $a_0$ . Intenzita svazku je dána kvadrátem amplitudy a po průchodu prvním zrcadlem platí

$$I = (1 - R)I_0 = T I_0, \quad (3.9)$$

kde  $I_0$  je intenzita svazku  $I_0 = a_0^2$ ,  $R$  je odrazivost, resp.  $T$  je propustnost záření.

Pro amplitudy následujících odrazů platí

$$\begin{aligned} a_{i1} &= \sqrt{1 - R} a_0 \\ a_{i2} &= R a_{i1} = \sqrt{1 - R} R^1 a_0 \\ a_{i3} &= R a_{i2} = \sqrt{1 - R} R^2 a_0 \\ &\vdots \\ a_{in} &= R a_{i(n-1)} = \sqrt{1 - R} R^{(n-1)} a_0 \end{aligned} \quad (3.10)$$

V případě, že je část svazku propuštěna druhým zrcadlem platí pro amplitudy:

$$\begin{aligned} a_1 &= \sqrt{1 - R} a_{i1} = (1 - R) a_0 \\ a_2 &= \sqrt{1 - R} a_{i2} = (1 - R) R^1 a_0 \\ a_3 &= \sqrt{1 - R} a_{i3} = (1 - R) R^2 a_0 \\ &\vdots \\ a_n &= \sqrt{1 - R} a_{in} = (1 - R) R^{n-1} a_0 \end{aligned} \quad (3.11)$$

Více o Fabry-Perotově interferometru a odvození najdeme v [10].

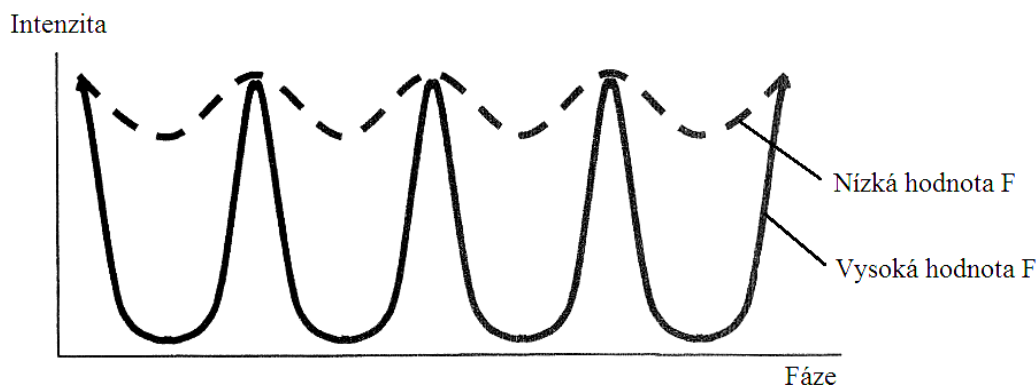
Mějme tedy přenosovou funkci (tzv. Airyho funkci), která je dána

$$I = \frac{I_0}{1 + F \sin^2 \frac{\varphi}{2}}, \quad (3.12)$$

kde  $\varphi$  je fázový rozdíl mezi sousedními paprsky a  $F$  je činitel jemnosti (coefficient of finesse), který charakterizuje fázové rozlišení interferometru. Pokud zanedbáme útlum, můžeme činitel jemnosti spočítat z odrazivosti  $R$  jako

$$F = \frac{4R}{(1-R)^2}. \quad (3.13)$$

Effekt vícenásobných přechodů mezi odraznými plochami zvyšuje citlivost. Čím větší je odrazivost zrcadel, tím větší bude počet přechodů mezi zrcadly. Z toho můžeme usuzovat, že činitel jemnosti, odrazivost a citlivost spolu úzce souvisí, což také můžeme vidět na obrázku 3.7.



Obrázek 3.7: Průběh Airyho funkce pro různé činitele jemnosti  $F$

Fabry-Perotovy interferometry se mohou používat jako citlivé optické vláknové senzory pro měření fyzikálních veličin, a to i na těžko dostupných místech, kdy pro vstup do rezonátoru a výstup z něj se používají optická vlákna. Rezonátor jako takový je externím prvkem. Tento princip je použitelný např. pro konstrukci měřiče teploty. Velkou výhodou je jednodušší detekce signálu v porovnání s jinými interferometrickými senzory, nevýhodou je náročná technologie výroby rezonátoru.[6][8]

## 4 Zdroje a detekce koherentního záření

V předcházejících kapitolách byla převážně řeč o principech interference a základních typech interferometrů. Víme, že nutnou podmínkou pro vznik interferencí je použití koherentních zdrojů záření, což jsou např. laserové diody. V této kapitole bude dále také řeč o základních typech fotodetektorů a jejich principech.

### 4.1 Laserové diody

Slovo LASER bylo vytvořeno z počátečních písmen anglického slovního spojení pro zařízení, které zesiluje světlo za použití stimulované emise (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Princip laseru už předpověděl v roce 1916 Albert Einstein, nicméně k jeho realizaci došlo až o necelých 50 let později z důvodů dosažení vyššího stupně vývoje v oblasti polovodičových struktur.

Optické záření generované laserem je soustředěno do velmi úzkého intervalu vlnových délek (monochromaticnost) a vyznačuje vysokou zářivostí a malou rozbíhavostí laserového svazku. Existuje značné množství laserů, ale jen některé z nich jsou vhodné pro použití v telekomunikační technice. V dalším textu se tedy budeme zabývat výhradně polovodičovými lasery, a to z důvodů jejich velikostí, váhy a množství integrace s dalšími komponentami.

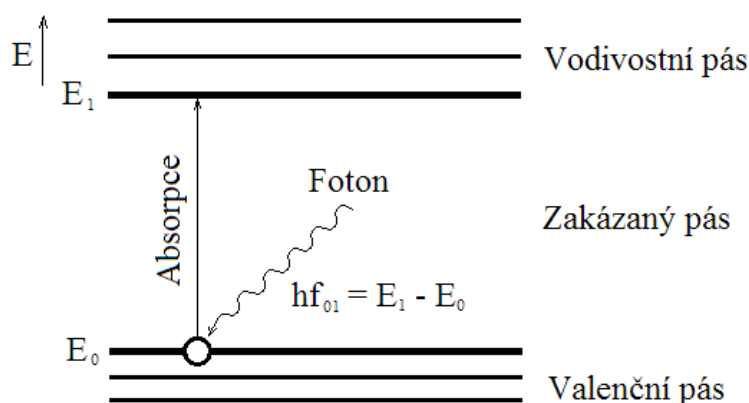
Obecně se laser skládá ze 3 hlavních součástí, a to zdroje energie, aktivního prostředí a rezonátoru.

#### 4.1.1 Absorpce záření

Elektrické a optické vlastnosti polovodičů jsou dány vlastní existencí dvou oddělených energetických hladin, tzv. valenčního pásu a vodivostního pásu. Tyto dvě energetické hladiny jsou od sebe odděleny tzv. zakázaným pásem. Abychom mohli generovat světlo, musíme nosičům náboje (elektronům) ve valenčním páse dodat potřebnou energii. Vlivem absorpce energie (dopadající „foton“) dochází k excitaci elektronů z nižší energetické hladiny do vyšší. K tomu dojde právě tehdy, má-li foton energii rovnu rozdílu mezi energií odpovídající té hladině, na níž se elektron dostává a energií hladiny, na níž se elektron před přeskokem pohyboval. Proto musí platit

$$hf_{01} = E_1 - E_0, \quad (4.1)$$

kde  $h$  je Planckova konstanta a  $f_{01}$  je frekvence absorbovaného fotonu. Princip absorpce můžeme vidět na níže uvedeném obrázku 4.1.

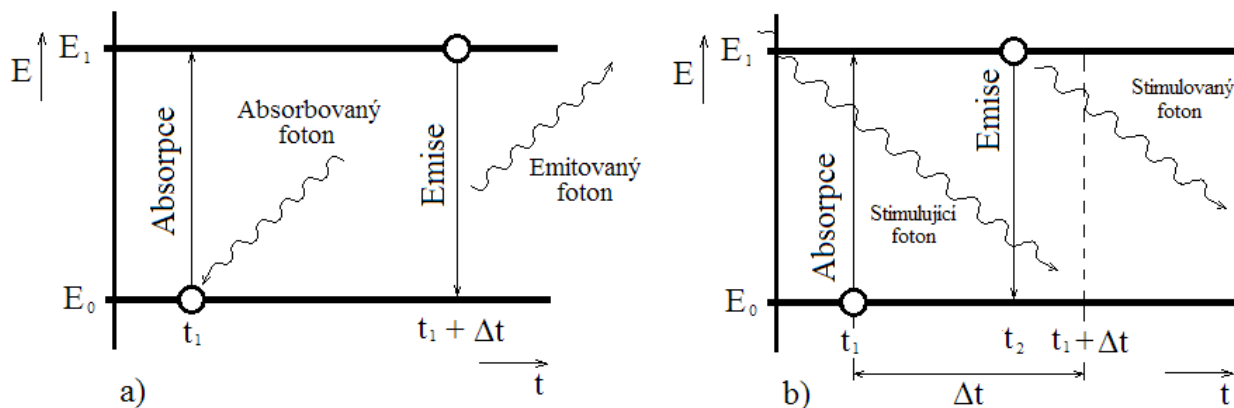


Obrázek 4.1: Absorpce fotonu v polovodiči

Elektrony setrvávají v excitovaném stavu velmi krátkou dobu ( $10^{-3}$  až  $10^{-7}$  s), poté se vracejí zpět do stavu s minimální energií. Přitom dochází k emisi fotonu, popř. fononu (kvantum tepelné energie). Při emisi fotonu jde o zářivý přeskok. Emise může proběhnout jako spontánní (samovolná – luminiscenční diody), nebo stimulovaná (vynucená), která je nutná pro vznik laserového záření.[11]

#### 4.1.2 Stimulovaná emise záření

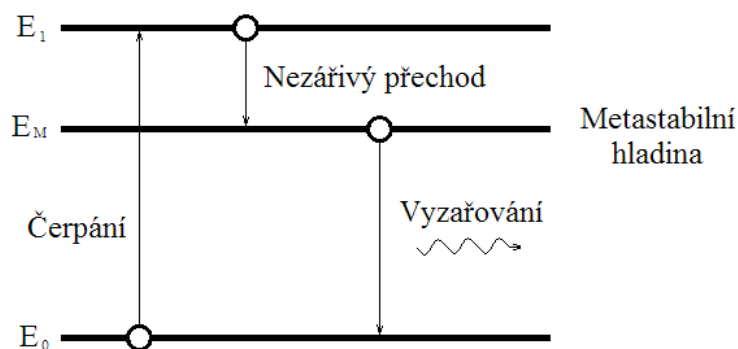
Mějme opět dvě oddělené energetické hladiny doplněné o časovou osu  $t$ . U samovolné emise záření by v okamžiku  $t_1$  došlo k excitaci elektronu a jeho přechodu do vyššího energetického stavu. Po uplynutí určitého časového intervalu  $\Delta t$  by elektron přešel zpátky do základního stavu, přičemž by byl vyzářen foton s energií  $E_1 - E_0$  s nahodilou fází, polarizací i směrem šíření. U stimulované emise hraje důležitou roli tzv. stimulující foton, který přivedeme do energetické soustavy v časovém okamžiku  $t_2$ , který předchází okamžiku vzniku samovolné emise  $t_1 + \Delta t$ . Tento stimulující foton způsobí, že elektron na vyšší energetické hladině emituje na hladinu nižší v čase  $t_2$  a nikoliv v čase  $t_1 + \Delta t$ . Přitom vyzáří nový foton, který na rozdíl od samovolné emise má stejnou energii, stejný směr šíření, stejnou fázi i polarizaci vlnění jako foton stimulující. Stimulující foton není pohlcen a projde energetickou soustavou (jinými slovy: vstupuje jeden foton, vystupují dva navzájem koherentní fotony). Princip samovolné a stimulované emise vidíme na obrázku 4.2.[11]



Obrázek 4.2: Emise záření: a) samovolná, b) stimulovaná

### 4.1.3 Inverze populace

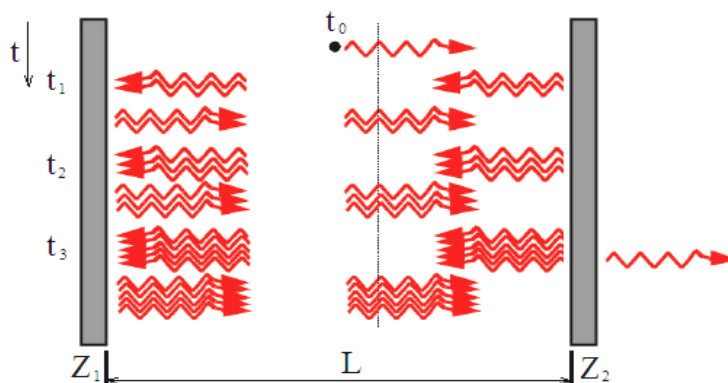
Je další nezbytně nutná podmínka pro vznik koherentního laserového záření. Elektrony v látce s termodynamickou rovnováhou se v běžných podmínkách snaží zaujímat stavy na co nejnižší energetické hladině, tzn. že počet elektronů na nižší energetické hladině je mnohem více, než excitovaných elektronů na hladině vyšší (zachovává se rovnovážný stav). Při inverzi populace potřebujeme pravý opak (dostat větší počet částic na vyšší energetickou hladinu). Proto je třeba elektrony v látce budit vhodným množstvím energie (čerpacím zdrojem), který v důsledku absorpce budící energie zmenšuje počet neexcitovaných elektronů. Dále je třeba zajistit, aby excitované elektrony zůstaly na vyšší energetické hladině co nejdéle. Toho můžeme docílit volbou energetických hladin s vhodnými parametry (metastabilní hladiny). Splnění těchto podmínek způsobí nerovnovážný stav a vzniká inverze populace (obrázek 4.3). Látka v tomto stavu tvoří tzv. aktivní laserové prostředí, jež je schopno zesilovat světlo.[11]



Obrázek 4.3: Inverze populace

### 4.1.4 Optické rezonátory

Základním stavebním prvkem každého laseru je rezonátor. Optickým rezonátorem se rozumí dutina obklopená odrazovými plochami (polopropustným a plně odrazným zrcadlem), v níž je pasivní dielektrické prostředí. Odrazy záření v rezonátoru se využívají k dosažení inverze populace. Nejjednodušším příkladem optického rezonátoru je soustava dvou rovnoběžných rovinných zrcadel v určité vzdálenosti, tzv. Fabry-Perotův rezonátor (obrázek 4.4).



Obrázek 4.4: Fabry-Perotův rezonátor

Tento rezonátor využívá kladné zpětné vazby, která část zesíleného signálu z výstupu přivádí na vstup. Jinými slovy, fotony procházející aktivním prostředím se odrážejí od obou zrcadel, kdy část fotonů projde polopropustným zrcadlem ve formě svazku koherentního optického záření a druhá část se vrátí a díky stimulované emisi způsobí opětovné vybuzení elektronů na vyšší energetické hladiny a tím pádem vznik dalších fotonů.

Energetické pole v dutině rezonátoru má charakter stojatých vln. Vlivem destruktivní a nedestruktivní interference vln, které se odrážejí od stěn, se ustálí elektromagnetické pole do tzv. módů (vidů). Ty mohou být tvořeny pouze zářením o takových vlnových délkách v materiálu dutiny, že rozměry rezonátoru lze vyjádřit jako celočíselný násobek jejich poloviny. [12]

$$L = \frac{\lambda q}{2n}, \quad (4.2)$$

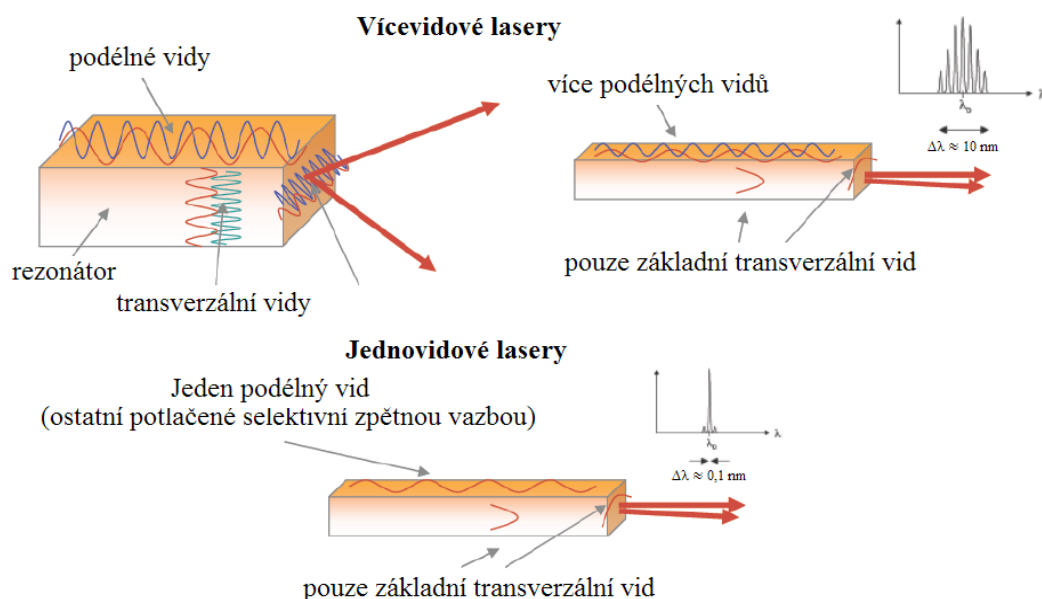
kde  $L$  je délka rezonátoru,  $\lambda$  vlnová délka záření v dutině,  $q$  je celé číslo a  $n$  je index lomu.

Každý vid v rezonátoru má své specifické rozložení pole a disponuje jinou optickou frekvencí záření. Rozestup mezi frekvencemi, resp. vlnovými délkami je dán vztahem 4.3 resp. vztahem 4.4.

$$\Delta f = \frac{c}{2nL} \quad (4.3)$$

$$\Delta \lambda = \frac{\lambda^2}{2nL} \quad (4.4)$$

Větší počet vzniklých vidů při vyvazování z rezonátoru nepříznivě ovlivňují kvalitu vyzářeného optického pole. Příčinou jsou tzv. transversální (příčné) a podélné vidy (obrázek 4.5).



Obrázek 4.5: Souvislost mezi vidy a rozměry optického rezonátoru [13]

Transverzální jsou ty, které vznikají v rezonátoru kolmo na směr výstupního svazku. Můžeme je odstranit např. malými příčnými rozměry rezonátoru. U vidů podélných, které zhoršují spektrum laseru, nese každý vid optické pole s jinou vlnovou délkou (frekvencí). Vzniká tzv. hřebenové spektrum, kdy jednotlivé hřebeny se mění co do výšky v čase s velmi krátkou periodou (ns, ps). To také přispívá ke zvětšení šumu laseru. Potlačení podélných vidů se provádí metodou vlnově selektivní zpětné vazby uvnitř rezonátoru, která pro jiné vidy než základní porušuje podmínku nutnou pro vznik oscilací. Dvě nejpoužívanější metody jsou:

- Distribuovaná zpětná vazba pomocí braggovské mřížky (FBG) – tyto lasery se potom nazývají jako lasery s distribuovanou zpětnou vazbou DFB
- Soustředěné braggovské reflektory umístěné podélně na koncích čipu laseru – označení laserů jako lasery s braggovským reflektorem DBR [13]

## 4.2 Fotodetektory

Fotodetektory jsou do značné míry rozhodujícími prvky optoelektronického řetězce pro přenos a zpracování signálů. Můžeme je definovat jako zařízení, které převádí dopadající optický tok, nebo optický výkon na elektrický signál za použití foto absorpce vhodných materiálů. Pro naše účely se zaměříme na nejvyužívanější oblast fotodetektorů, a tím budou polovodičové fotodiody.

Funkce fotodiod je založena na absorpci světla a generaci nadbytečných nositelů v nevlastním polovodiči (většinou typ P nebo intrinsická vrstva polovodiče) a na vzniku fotovoltaiického jevu mezi přechody P-N. Ve vrstvě typu P, většinou závěrně polarizované, dochází k silné absorpci záření a vzniku nadbytečných párů elektron – díra. Přitom se zvýší koncentrace minoritních nosičů náboje, které jsou v blízkosti zavřeného přechodu vtahovány driftovým polem do depletiční (vyprázdněné) vrstvy a zvyšují tak zbytkový proud přechodu. Detekovaný elektrický proud  $I_0$  přechodu v závěrném směru je dán vztahem

$$I_0 = P_0 R \quad , \quad (4.5)$$

kde  $P_0$  je výkon optického záření dopadající na fotodiodu a  $R$  je citlivost fotodetektoru. Citlivost je velmi důležitým parametrem a udává převodní vztah mezi optickou a elektrickou stranou fotodiod.

$$R = \frac{\eta q}{hf} = \frac{\eta q}{hc} \lambda \quad , \quad (4.6)$$

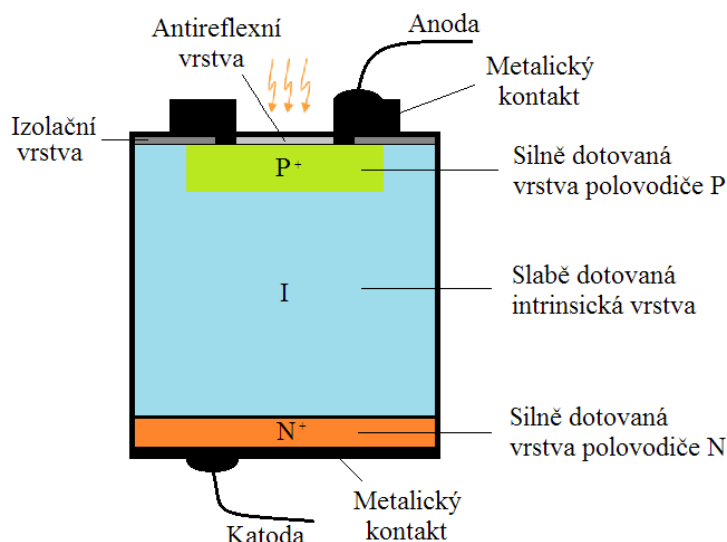
kde  $\eta$  je kvantová účinnost,  $q$  je náboj elektronu,  $h$  je Planckova konstanta a  $f$  je optická frekvence.

V praxi se využívají nejčastěji dva typy fotodetektorů využívající PN přechod, a to PIN fotodiody a APD fotodiody.



### 4.2.1 PIN fotodioda

Fotodioda PIN (obrázek 4.6) je taková dioda, která je rozšířená o tzv. intrinsickou vrstvu I mezi tenkými, silně dopovanými polovodiči typu P a N, které mohou pohltit jen zanedbatelnou část dopadajícího toku. Intrinsická vrstva, která rozšiřuje vyprázdněnou oblast, je slabě dotovaná a musí být dostatečně tlustá (až několik desítek  $\mu\text{m}$ ), aby pohltila co nejvíce fotonů. Navíc umožňuje díky použitému vysokému závěrnému napětí dosáhnout vysoké intenzity driftového pole, což výrazně přispívá ke zkrácení doby průletu generovaných nosičů diodou. I když je průlet nosičů náboje rychlejší, nemůžeme si dovolit stále zvětšovat intrinsickou vrstvu do neúměrných hodnot. Je to z toho důvodu, že při hodně velké tloušťce nepříznivě ovlivňujeme dynamické vlastnosti fotodiody (dobu odezvy, šířku pásma).



Obrázek 4.6: Konstrukce fotodiody PIN

Protože je v PIN diodě značně potlačena absorpce v P a N vrstvách, kde pomalé nosiče snadno rekombinují, zvyšuje se u této diody kvantový výtěžek z původních 50% odpovídající klasickým PN diodám na 80 – 90%. Přitom klesá doba odezvy, která je pod 100 ps. Pro určení jakosti rychlých fotodetektorů se zavádí tzv. činitel kvality  $G$  daný součinem kvantového výtěžku  $\eta_k$  a horní mezní frekvence  $f_H$  charakteristické pro daný prvek.[14]

$$G = \eta_k f_H = \frac{\eta_k}{2\pi\tau_{min}} \quad (4.7)$$

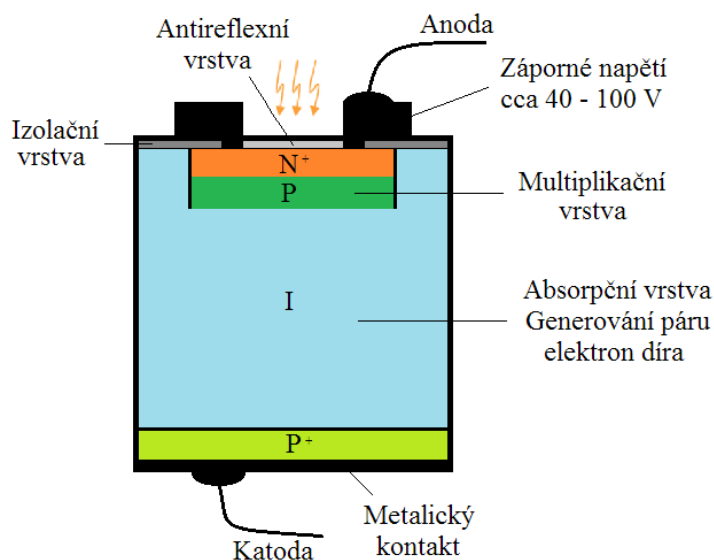
### 4.2.2 APD fotodioda

APD fotodioda, neboli lavinová fotodioda (obrázek 4.7), je velmi podobná PIN fotodiodě. Je zde však přidána další vrstva (multiplikační), která díky silnému elektrickému poli, vyvolaným závěrným napětím, způsobuje násobící efekt nosičů elektrického náboje. Elektrické pole v depletiční vrstvě může dosáhnout takových hodnot, že volné nosiče zde získávají takovou rychlost, která

dostačuje, aby kinetická energie jejich pohybu předaná při srážkách vedla k ionizaci krystalové mřížky. Kinetická energie volných nosičů musí převyšovat energetickou bariéru zakázaného pásu. Pokud se tak stane, generují se nové páry elektron – díra, které způsobují lavinový efekt. Výsledný zisk je pak dán vztahem

$$I = MRP \quad , \quad (4.8)$$

kde I je proud protékající diodou v závěrném směru, M je multiplikační faktor, R je citlivost diody bez multiplikační vrstvy (jako by PIN dioda) a P je dopadající výkon záření.



Obrázek 4.7: Konstrukce lavinové fotodiody APD

Multiplikační faktor je silně závislý na velikosti závěrného napětí a teplotě, kdy roste náročnost na stabilizaci pracovního bodu. Dále závisí na vliv ionizačního koeficientu mezi elektrony a díry ( $\alpha_n$ ,  $\alpha_p$ ) resp. jejich poměru ( $K_n = \alpha_p/\alpha_n$  resp.  $K_p = \alpha_n/\alpha_p$ ). Multiplikační faktor udává celkový počet nosičů podílejících se na proudu přechodem ku celkovému počtu nosičů generovaných absorpcí fotonů.

$$M_{n,p} = \frac{(1 - K_{n,p}) e^{\alpha_{n,p} W_a (1 - K_{n,p})}}{1 - K_{n,p} e^{\alpha_{n,p} W_a (1 - K_{n,p})}} \quad , \quad (4.9)$$

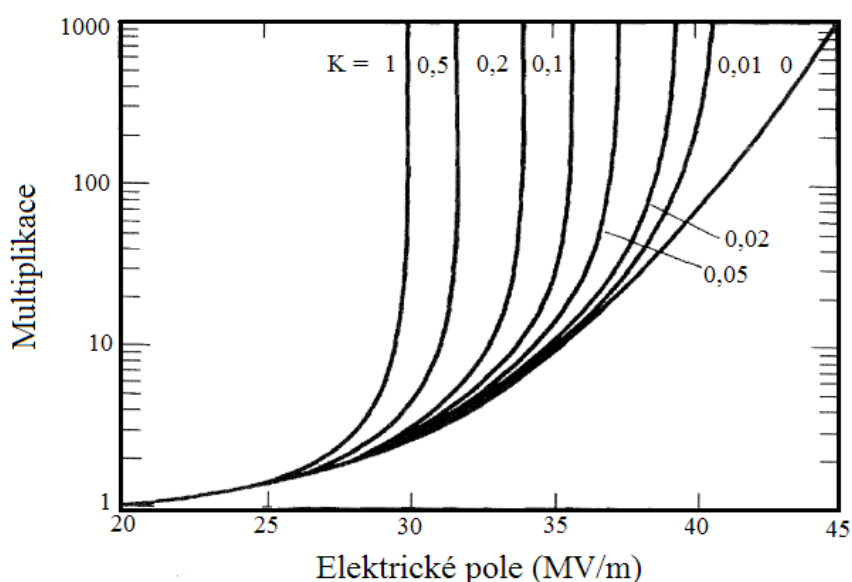
kde  $W_a$  je šířka lavinové oblasti.

Multiplikační faktor můžeme také aproximovat použitím znalostí o průrazném závěrném napětí  $U_{BR}$ , kde parametr  $n$  je experimentálně určený parametr ( $n = 1,5 - 4$  pro Si,  $2,5 - 9$  pro Ge).

$$M = \frac{1}{1 - \left( \frac{U_R}{U_{BR}} \right)^n} \quad (4.10)$$

Díky lavinovému efektu roste citlivost fotodiody, nicméně roste také úroveň vlastního multiplikačního šumu. Nejnižšího šumového čísla a nejvyšší detektivity dosahuje dioda při napětí odpovídajícím hodnotě průrazu za tmy.[14]

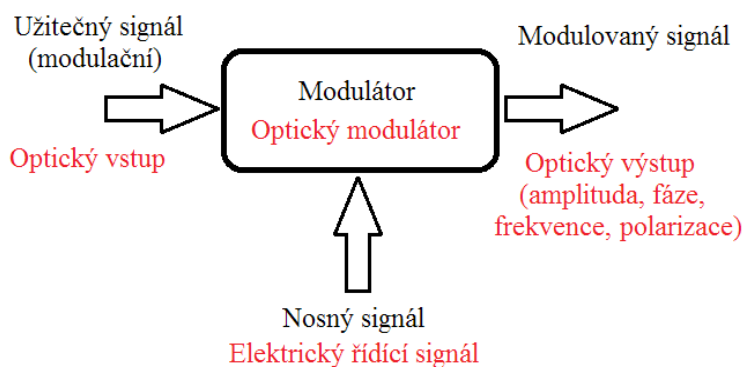
Na obrázku 4.8 můžeme vidět závislost multiplikačního faktoru na elektrickém poli. Na první pohled vidím, že lavinový efekt se bude mnohem lépe ovládat právě když ionizační koeficient se blíží k nule. Nicméně nevýhodou je, že budeme muset zvětšit elektrické pole (napětí na diodě), a tím pádem poroste spotřeba. Pokud se ionizační koeficient bude blížit hodnotě jedna, bude zesílení (multiplikace) vyšší, ale mnohem komplikovanější na kontrolu, protože bude vznikat více dodatečného šumu. Proto je lepší používat APD fotodiodu co nejvíc od hodnoty  $K = 1$  a mít vyšší stabilitu a méně šumu.[8]



Obrázek 4.8: Závislost multiplikačního faktoru na elektrickém poli[8]

## 5 Modulátory a přepínače

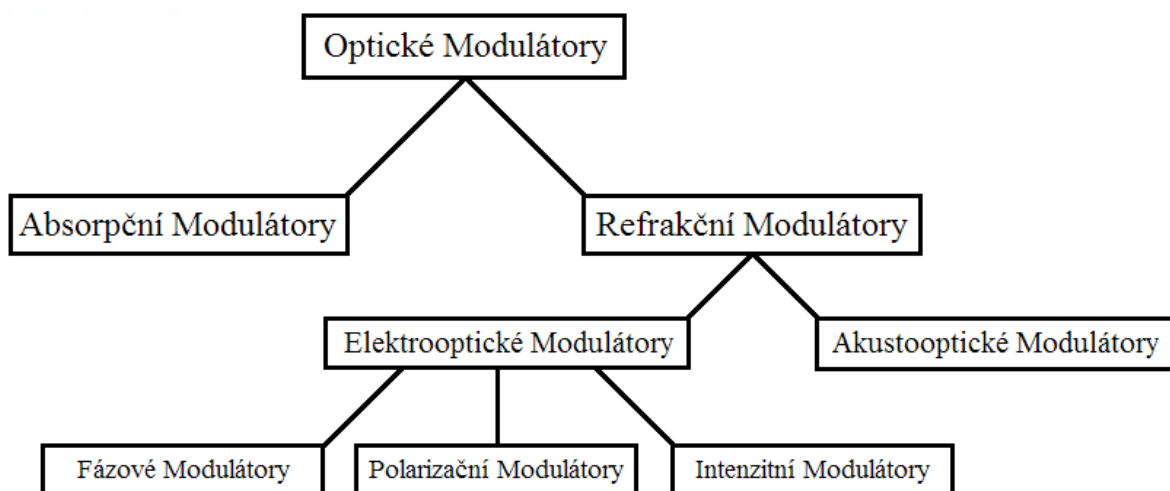
Modulátory jsou zařízení, které se používají pro modulaci výstupního signálu. Modulací se rozumí proces v čase, kdy se mění charakter nosného signálu pomocí modulujícího signálu. V optických systémech se užitečný signál mění v závislosti na řídicím elektrickém signálu. Výsledkem pak může být výstupní signál o jiné amplitudě, fázi, frekvenci nebo polarizaci. Princip modulátoru je znázorněn na obrázku 5.1.



Obrázek 5.1: Základní princip modulátoru

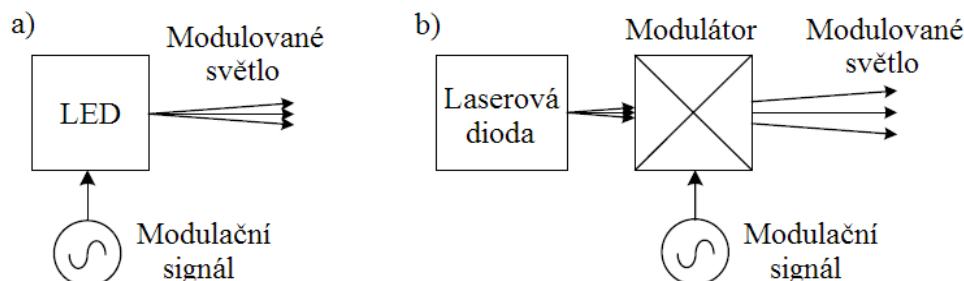
Modulace se velmi často používá při přenosu nebo záznamu elektrických nebo optických signálů. Aby mohlo k modulaci dojít, musí modulátor obsahovat nějaký nelineární prvek. Jakmile se jakékoliv dva signály setkají na nějakém nelineárním prvku nebo v nelineárně se chovajícím prostředí, dojde k jejich vzájemnému působení na sebe, tzv. intermodulaci, což je určitý druh zkreslení, který můžeme využít.[15]

Optické modulátory můžeme rozdělit do několika skupin v závislosti na principu modulace. Rozdělení můžeme vidět na níže uvedeném obrázku 5.2.



Obrázek 5.2: Základní rozdělení optických modulátorů

Optická modulace může být dosažena dvěma způsoby, a to interní nebo externí modulací (obrázek 5.3). Závisejí na použití přenosových rychlostí.



Obrázek 5.3: Optická modulace: a) interní, b) externí[16]

Při nižších přenosových rychlostech můžeme modulovat přímo zdroj světla a hovoříme o tzv. interní modulaci. Pokud potřebujeme vyšší přenosové rychlosti, je třeba použít tzv. externí modulaci, protože u interní modulace zdroj světla neustále vypínáme a zapínáme, což vede ke změně hustoty nosičů a způsobuje frekvenční posuvy v nosičích, a to následně vede k disperzi. Při externí modulaci jsou generování světla a proces modulace odděleny, takže nedochází k výše popsaným jevům. Světelný zdroj svítí kontinuálně, světlo prochází externím zařízením, jehož přenosové vlastnosti jsou ovlivněny modulačním signálem. Takové systémy mají výhodu ve využití plné kapacity výkonu zdroje. Nevýhodou externích modulátorů je omezení modulačního rozsahu a obecně vyžadují vyšší řídicí výkon, kdežto výhody interní modulace jsou v jednoduchosti, kompaktnosti a ceně.[16]

V mnoha případech mohou modulátory pracovat i jako přepínače. Závisejí na velikosti interakce mezi světelnou vlnou a řídicím elektrickým signálem. Pokud je zařízení bráno jako modulátor, jeho primární funkcí je vtisknout informaci na světelnou vlnu za použití dočasných změn jedné ze svých vlastností. Na druhou stranu přepínač mění prostorovou polohu světla, jinými slovy dochází k zapínání a vypínání světla. Modulátory a přepínače mají důležité parametry o kterých bude řeč níže.

## 5.1 Základní vlastnosti modulátorů a přepínačů

### 5.1.1 Modulační hloubka

Jednou ze základních vlastností modulátorů je modulační hloubka, nebo také modulační index  $\eta_M$ . V případě intenzitního modulátoru, kdy použitý přiložený elektrický signál ovlivňuje intenzitu světla, je modulační hloubka dána jako

$$\eta_M = (I_0 - I) / I_0 \quad (5.1)$$

když elektrický signál snižuje výstupní intenzitu světla a

$$\eta_M = (I - I_0) / I_{max} \quad (5.2)$$

když použitý elektrický signál zvyšuje intenzitu světla, kde  $I$  je výstupní intenzita,  $I_0$  je intenzita při nepoužitém elektrickém signálu a  $I_{\max}$  je intenzita, kdy je použita maximální hodnota elektrického signálu. Pro maximální hloubku modulace, neboli extinkční poměr platí vztah

$$\eta_{\max} = (I_0 - I_{\max}) / I_0 \quad \text{pro} \quad I_{\max} \leq I_0 \quad (5.3)$$

nebo

$$\eta_{\max} = (I_{\max} - I_0) / I_{\max} \quad \text{pro} \quad I_{\max} \geq I_0 \quad (5.4)$$

Hloubku modulace můžeme také definovat pro fázové modulátory pokud platí, že změna fáze  $\Delta\varphi$  je funkčně spojená s odpovídající změnou intenzity. Pak vyjádříme hloubku modulace jako

$$\eta_M = \sin^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right). \quad (5.5)$$

### 5.1.2 Šířka pásma

Šířka pásma je další důležitou vlastností modulátorů. Vyjadřuje rozsah modulačních frekvencí, se kterou je zařízení schopno pracovat. Šířka pásma se bere jako rozdíl mezi horní frekvencí a dolní frekvencí, kdy modulační hloubka spadá do 50% maximální hodnoty. V případě přepínačů je frekvenční odezva dána rychlostí přepínání  $T$ . Ten souvisí právě s šířkou pásma  $\Delta f$  a je dán

$$T = \frac{2\pi}{\Delta f}. \quad (5.6)$$

Modulační šířka pásma je velmi důležitý faktor při multiplexování více informačních kanálů do jednoho optického paprsku. Proto se snažíme o to, aby modulátory a přepínače měly co nejrychlejší přepínací čas a co největší šířku pásma. Zařízení s těmito vlastnostmi jsou proto velmi užitečné v telekomunikačních systémech.

### 5.1.3 Vložné ztráty

Dalším důležitým parametrem modulátorů a přepínačů jsou vložné ztráty, nebo také vložný útlum. Tento parametr nám vyjadřuje logaritmický poměr mezi optickou intenzitou  $I_t$  přenášenou ve vlnovodu před vložením modulátoru, k optické intenzitě  $I_0$ , kdy je modulátor na svém místě, avšak nemoduluje. Jednotkou je decibel.

$$L = 10 \log \frac{I_t}{I_0} \quad (5.7)$$

### 5.1.4 Výkonová spotřeba

Každý modulátor nebo přepínač má výkonovou (energetickou) spotřebu. V případě modulátoru tato spotřeba roste s použitou modulační frekvencí. V praxi se proto zavádí jednotka  $P/\Delta f$ , většinou vyjádřená v mW/MHz. Velmi obdobné je tomu i pro optické přepínače, které pracují s velkou rychlostí přepínání. Pokud ale rychlost přepínání bude malá, tak nás bude spíše zajímat spotřeba energie k tomu, aby přepínač udržel daný stav. V ideálním případě bychom však potřebovali, aby ke ztrátám docházelo pouze při změně stavu (energetické nároky na udržení stavu by byly zanedbatelné). To však u elektrooptických přepínačů není možné.

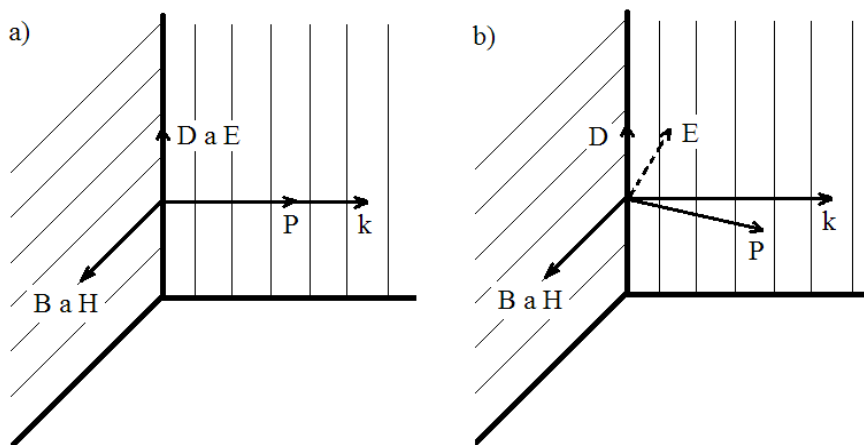
Více o vlastnostech modulátorů a přepínačů v [17].

## 5.2 Elektrooptický jev

Princip elektrooptického jevu je založen na změně indexu lomu nelineárního (anizotropního) krystalu pomocí přiloženého elektrického pole. Elektrooptický jev je složen jak z lineárního (Pockelsova) jevu, kde změna indexu lomu je úměrná intenzitě elektrického pole, tak také nelineárního (Kerrova) jevu, kde se index lomu mění kvadraticky vlivem působení elektrického pole. Proto, abychom mohli vůbec využívat elektrooptického jevu při modulacích, je třeba mít v modulátorech speciální anizotropní materiály (krystaly) o specifických vlastnostech.

### 5.2.1 Anizotropní materiály (krystaly)

V každém anizotropním (opticky neaktivním, dvouosém) krystalu se lineárně polarizované vlny šíří v navzájem kolmých směrech s rozdílnou fázovou rychlostí danou vlnovým vektorem  $k$ . Na rozdíl od izotropních optických materiálů, kde jsou vektory  $D$  (el. indukce) a  $E$  (el. intenzita),  $B$  (mag. indukce) a  $H$  (mag. intenzita),  $P$  a  $k$  kolineární, u anizotropních materiálů tomu tak být nemusí (obrázek 5.4).



Obrázek 5.4: Optický krystal: a) izotropní, b) anizotropní

Šíření dvou navzájem kolmých vln přímo souvisí s vlastnostmi anizotropního materiálu, které se mění v závislosti na směru šíření vln. Jinými slovy, optický signál mající lineární polarizaci získává průchodem skrz krystal pouze takovou polarizaci, jež mu umožňuje symetrie krystalu. Závislost mezi vektorem polarizace  $P$  a intenzitou elektrického pole  $E$  je popsána dielektrickým tenzorem  $\epsilon$  resp.  $\mu$ . Tento tenzor je symetrický v hlavní diagonále a můžeme jej vyjádřit pomocí matice

$$[\epsilon] = \begin{bmatrix} \epsilon_x & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_z \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

Výše uvedený tenzor můžeme využít při převodu mezi  $E$  a  $D$ , kde

$$\begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_x & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

Pro homogenní, nemagnetický, bezztrátový, opticky neaktivní, a nevodivý materiál, má tenzor permitivity pouze reálné složky. Kromě toho tenzor permitivity a jeho inverze ( $\epsilon^{-1} = 1/\epsilon_0 (1/n^2)$ ), kde  $n$  je index lomu, je symetrický pro všechny třídy krystalů a pro všechny orientace dielektrických os.

Jedna z možností zkoumání vlivu vnějšího elektrického pole na optické vlastnosti materiálu je sledování změn tzv. indexového elipsoidu. Rovnice indexového elipsoidu při přítomnosti elektrického pole je dána vztahem

$$\left(\frac{1}{n^2}\right)_1 x^2 + \left(\frac{1}{n^2}\right)_2 y^2 + \left(\frac{1}{n^2}\right)_3 z^2 + 2\left(\frac{1}{n^2}\right)_4 yz + 2\left(\frac{1}{n^2}\right)_5 xz + 2\left(\frac{1}{n^2}\right)_6 xy = 1 \quad (5.10)$$

Jestliže  $x$ ,  $y$  a  $z$  jsou kolmé k hlavním dielektrickým osám krystalu, pak koeficienty v důsledku elektrického pole vypadají následovně.

$$\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_i = \sum_{j=1}^3 r_{ij} E_j, \quad \text{kde } i = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \text{ a } j = 1, 2, 3 \text{ jsou spojené s } x, y, z. \quad (5.11)$$

Z této definice vyplývá, že aplikované elektrické pole mění velikost, tvar a orientaci indexu lomu elipsoidy, takže analýza může být velmi obtížná. Ve velkém množství případů se naštěstí problém velmi zjednoduší díky výhodě v krystalové symetrii.[17][18][19]

Průhledné krystalické materiály mohou vykazovat různé druhy optických nelinearit, které jsou spojeny s nelineární polarizací. Například materiály s  $\chi^{(2)}$  nelinearitou se používají hlavně pro parametrické nelineární frekvenční konverze (optické parametrické oscilátory, elektrooptické modulátory). Materiály s  $\chi^{(3)}$  nelinearitou vedou ke kvadratickému Kerrova efektu nebo Ramanovu



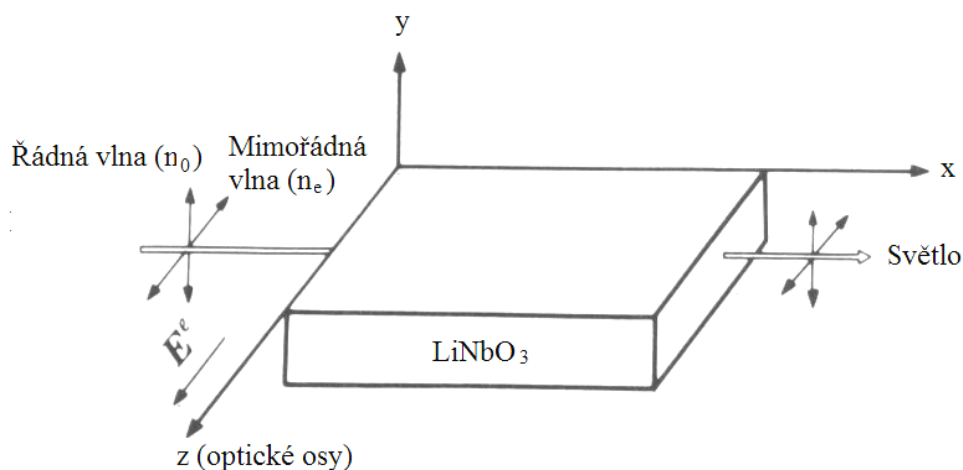
jevu (čtyřvlonné směšování). Nicméně téměř ve všech případech jsou všechny tyto krystalické materiály umělé, přirozeně se nevyskytující.

Mezi nejpoužívanější nelineární krystalické materiály patří lithium niobát ( $\text{LiNbO}_3$ ) a lithium tantalát ( $\text{LiTaO}_3$ ). Tyto materiály mají relativně silnou nelinearitu, a proto se používají pro nelineární frekvenční konverzi a do elektrooptických modulátorů. Oba materiály mají velmi podobné vlastnosti, jejich výraznější rozdíly se týkají periodického pólování a fotorefraktivních účinků. U periodického pólování jsou výsledné materiály nazývány PPLN (periodically poled lithium niobate) a PPLT (periodically poled lithium tantalat). Oba mají relativně nízký práh poškození, a jsou schopné pracovat, díky velké nelinearitě s nízkými intenzitami elektrického pole.

Materiál lithium niobátu je transparentní pro vlnové délky od 0,4 do 4,5  $\mu\text{m}$ . Pokud se nenachází v elektrickém poli je dvojlomný s indexem lomu vycházejícím z níže uvedené rovnice 5.12.

$$\frac{x^2}{n_o^2} + \frac{y^2}{n_o^2} + \frac{z^2}{n_e^2} = 1 \quad (5.12)$$

V každém směru se mohou šířit dvě vlny (obrázek 5.5), lišící se polarizací a indexem lomu, a to řádná vlna (index lomu  $n_o$  je obyčejný index lomu, který nezávisí na směru šíření a směr intenzity  $E$  je kolmý k optické ose krystalu a ke směru šíření) a mimořádná vlna ( $n_e$  je mimořádný index lomu, který závisí na úhlu  $\Theta$  mezi směrem šíření a optickou osou krystalu). Pro speciální případ, kdy se světelný signál šíří podél osy  $z$ , zůstává lineární polarizace nezměněna.



Obrázek 5.5: Šíření vln v lithium niobátu ( $\text{LiNbO}_3$ )

Výše uvedené vlastnosti vycházejí z charakteristiky materiálů  $\text{LiNbO}_3$  a  $\text{LiTaO}_3$  neboť tyto materiály spadají do 3 m krystalové struktury a jejich elektrický tenzor je

$$r_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & r_{22} & r_{13} \\ 0 & -r_{22} & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{51} & 0 \\ r_{51} & 0 & 0 \\ -r_{22} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

Hodnoty elektrooptických koeficientů pro lithium niobát (a pro porovnání také lithium tantalát) máme uvedeno v tabulce níže (tabulka 5.1).

*Tabulka 5.1: Přehled hodnot elektrooptických koeficientů*

Materiál	EO koeficienty [ $\times 10^{-12}$ m/V]	Index lomu
Lithium niobát ( $\text{LiNbO}_3$ )	$r_{13} = 8,6$ $r_{22} = 3,4$ $r_{33} = 30,8$ $r_{51} = 28$	$n_o = 2,286$ $n_e = 2,200$
Lithium tantalát ( $\text{LiTaO}_3$ )	$r_{13} = 7,5$ $r_{22} = 1$ $r_{33} = 33$ $r_{51} = 20$	$n_o = 2,176$ $n_e = 2,180$

Jak je z výše uvedených hodnot vidět, největší elektrooptický koeficient pro modulování lineárně polarizovaného světelného signálu má  $r_{33}$ . Pokud je k využití  $r_{33}$  elektrooptického koeficientu aplikováno podle osy z řízené pole  $E_z$  na  $\text{LiNbO}_3$ , rovnice elipsoidy se změní na

$$\left( \frac{1}{n_o^2} + r_{13} E_z \right) (x^2 + y^2) + \left( \frac{1}{n_e^2} + r_{33} E_z \right) z^2 = 1. \quad (5.14)$$

V tomto případě nevzniká žádná změna v orientaci elipsoidy a z toho vyplývá, že pokud se šíří optický signál přes nezměněné hlavní osy (x, y), zůstává lineární polarizace rovněž nezměněna, ale změní se indexy lomu uvnitř krystalu.

Dalším materiálem vyskytujícím se v elektrooptických zařízeních mohou být tekuté krystaly. Tyto materiály se skládají s velkých molekul, které mají trochu jiné vlastnosti než materiály popsané výše. Fyzika tekutých krystalů je velmi komplikovaná a pohyb tekutých krystalů je mnohem pomalejší než u elektronů (1  $\mu\text{s}$  – 1 ms), proto se používají spíše u velmi pomalých, nízko napětových Pockelsových člancích pro modulaci polarizace, fáze nebo amplitudy.[20]

Volba nejvhodnějšího krystalového materiálu pro danou aplikaci není vůbec jednoduchá. Musíme vzít v úvahu mnoho aspektů, např. vysoká nelinearita pro frekvenční konverze ultrakrátkých pulsů nepomůže v případě, že délka působení je silně omezena velkým nesouladem skupinové

rychlosti, a kde nízký práh poškození omezuje příslušné optické intenzity. Nebo dalším aspektem je to, zda-li je krystal transparentní pro všechny pracovní vlnové délky apod.[6][19][21]

### 5.2.2 Pockelsovy a Kerrovy koeficienty

Index lomu elektrooptického média je funkcí  $n(E)$  aplikovaného elektrického pole  $E$ . Tato funkce se mění jen velmi nepatrně, a proto může být rozšířena v Taylorovu řadu ( $E = 0$ ).

$$n(E) = n + a_1 E + \frac{1}{2} a_2 E^2 + \dots, \quad (5.15)$$

kde koeficienty Taylorova rozvoje jsou  $n = n(0)$ ,  $a_1 = (dn/dE)|_{E=0}$  a  $a_2 = (d^2n/dE^2)|_{E=0}$ . Z důvodu, který vyjde najevo později zavedeme do rozvoje (5.15) nové koeficienty  $r = -2a_1/n^3$  a  $s = -a_2/n^3$ , které budeme označovat jako elektrooptické koeficienty. Můžeme pak psát

$$n(E) = n - \frac{1}{2} r n^3 E - \frac{1}{2} s n^3 E^2 + \dots. \quad (5.16)$$

Členy druhého a vyššího řádu výše uvedeného rozvoje jsou obvykle o několik řádů menší než  $n$ , proto členy vyššího řádu jak třetího můžeme v klidu zanedbat.

Nyní je vhodné si odvodit výraz pro elektrickou impermeabilitu  $\eta$  elektrooptického média jako funkci elektrického pole  $E$ .

$$\eta = \frac{\epsilon_0}{\epsilon} = \frac{1}{\epsilon_r} = \frac{1}{n^2} \quad (5.17)$$

Tento parametr je užitečný při popisu optických vlastností anizotropního prostředí. Jeho změna je dána

$$\Delta\eta = \frac{d\eta}{dn} \Delta n = \frac{-2}{n^3} \left( -\frac{1}{2} r n^3 E - \frac{1}{2} s n^3 E^2 \right) \quad \text{kde} \quad (5.18)$$

kde  $\Delta n$  je odchylka indexu lomu od  $n$  pro  $n(E = 0)$ . A dostáváme

$$\eta(E) = \eta + r E + s E^2, \quad (5.19)$$

kde  $\eta = \eta(0)$ ,  $r$  je nazýván jako Pockelsův koeficient a  $s$  je nazýván jako Kerrův koeficient. Tyto koeficienty jsou jednoduše řečeno koeficienty úměrnosti  $\Delta\eta$  při  $E$  resp.  $E^2$  a jejich velikost závisí na směru elektrického pole a polarizace světla.[22]

### 5.2.3 Pockelsův a Kerrův jev

Na začátku kapitoly o elektrooptickém jevu byl zmíněn Pockelsův a Kerrův jev. Tomu odpovídají Pockelsovy a Kerrovy články, což jsou zařízení, které obsahují elektrooptický krystal, kterým se může šířit světelný paprsek. Můžeme si je představit jako napětově kontrolované vlnové

desky. Na rozdíl od Pockelsových článků jsou ty Kerrovy založeny na kvadratickém (nelineárním) elektrooptickém jevu.

#### Pockelsův jev:

V mnoha materiálech zanedbáváme z důvodů velikosti také i třetí člen rozvoje podle (15.6). Zbude nám pouze lineární člen (obrázek 5.6 a), kde

$$n(E) = n - \frac{1}{2} r n^3 E. \quad (5.20)$$

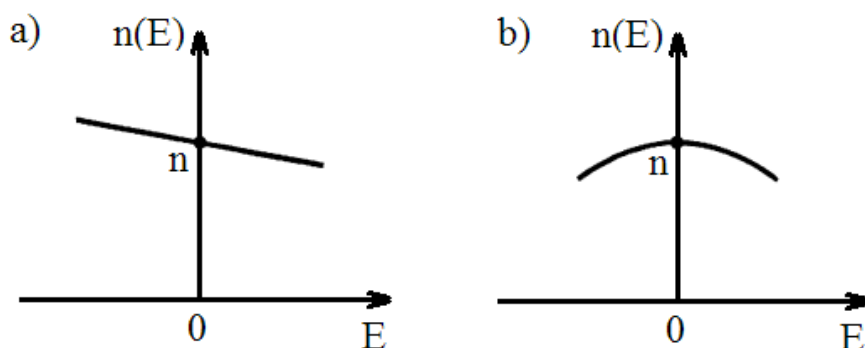
Typická hodnota Pockelsova koeficientu  $r$  leží v rozmezí  $10^{-12} - 10^{-10}$  m/V. Např. pro intenzitu pole  $E = 10^6$  V/m (napětí 10 kV na buňky o tloušťce 1 cm) je výsledná hodnota podle (5.20) řádově  $10^{-6}$  až  $10^{-4}$ . Z toho vyplývá, že změna indexu lomu vyvolaná elektrickým polem je velmi malá.

#### Kerrův jev:

V případě, že materiál je centrosymetrický, jak je tomu v případě plynů, kapalin a některých krystalů, pak funkce  $n(E)$  musí být také symetrická funkce (obrázek 5.6 b), neměnná k obrácené polaritě elektrického pole  $E$ . Lineární Pockelsův koeficient  $r$  vypadne a můžeme napsat

$$n(E) = n - \frac{1}{2} s n^3 E^2. \quad (5.21)$$

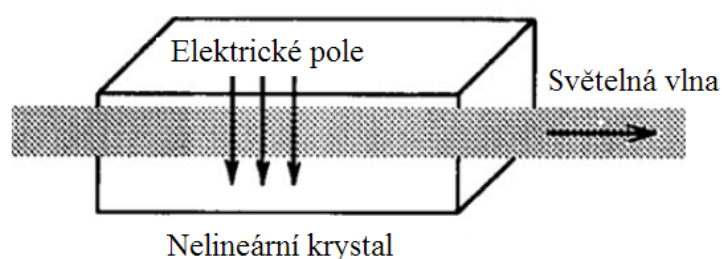
Typická hodnota Kerrova koeficientu  $s$  je v rozmezí  $10^{-18} - 10^{-14}$  m<sup>2</sup>/V<sup>2</sup>, pokud se jedná o krystal. V tekutinách je hodnota ještě mnohem menší ( $10^{-22} - 10^{-19}$  m<sup>2</sup>/V<sup>2</sup>). Pro intenzitu pole  $E = 10^6$  V/m je výsledná hodnota podle (5.21) řádově  $10^{-6}$  až  $10^{-2}$ . Při tomto napětí struktura Kerrova članku silně absorbuje UV záření. Proto je použitelnost těchto článků omezena na viditelnou a blízkou IR oblast.[20][22]



Obrázek 5.6: Závislost indexu lomu na elektrickém poli  $E$ :  
a) Pockelsův článek, b) Kerrův článek

### 5.3 Elektrooptické modulátory

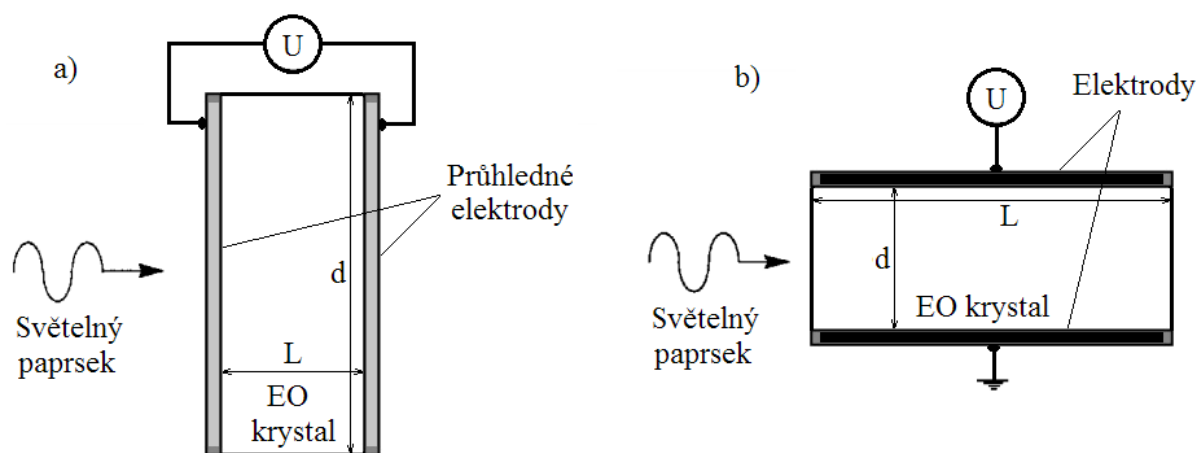
Elektrooptický modulátor je zařízení, které je principiálně založeno na elektrooptickém jevu, tedy změně indexu lomu nelineárního krystalu pomocí přiloženého elektrického pole (obrázek 5.7). V závislosti na konfiguraci jsme schopni kontrolovaně měnit vlastnosti světelné vlny (fázi, polarizaci, amplitudu, frekvenci nebo směr šíření). Tato zařízení jsou zpravidla navržena pro jednomódové zdroje (kvalitní lasery), nicméně je možné je použít i pro vícemódové, či širokopásmové lasery. Samozřejmě musíme počítat s degradací a snížením výkonosti.



Obrázek 5.7: Princip elektrooptického modulátoru

Elektrooptická zařízení můžeme používat jak pro analogové, tak i digitální modulační formáty. Volba závisí na systémových požadavcích a vlastnostech dostupných komponent (optická vlákna, zdroje, detektory atd.). Analogové modulace vyžadují velký odstup signálu od šumu (SNR), čímž omezíme šířku pásma a jsou vhodné spíše pro aplikace na kratší vzdálenosti, kdežto u digitálních modulací dosáhneme delších překlenutelných vzdáleností s větší šířkou pásma.

Elektrooptické modulátory můžeme rozdělit na dva typy, a to podélné a příčné v závislosti na přiloženém elektrickém poli vzhledem ke směru šíření světla (obrázek 5.8). Toto zařízení může být modelováno v podstatě jako kondenzátor, protože elektrooptický krystal je obložen dvojicí elektrod. Obecně platí, že vstupní a výstupní plochy jsou pro paprsek, u kterého provádíme fázový posun, rovnoběžné.



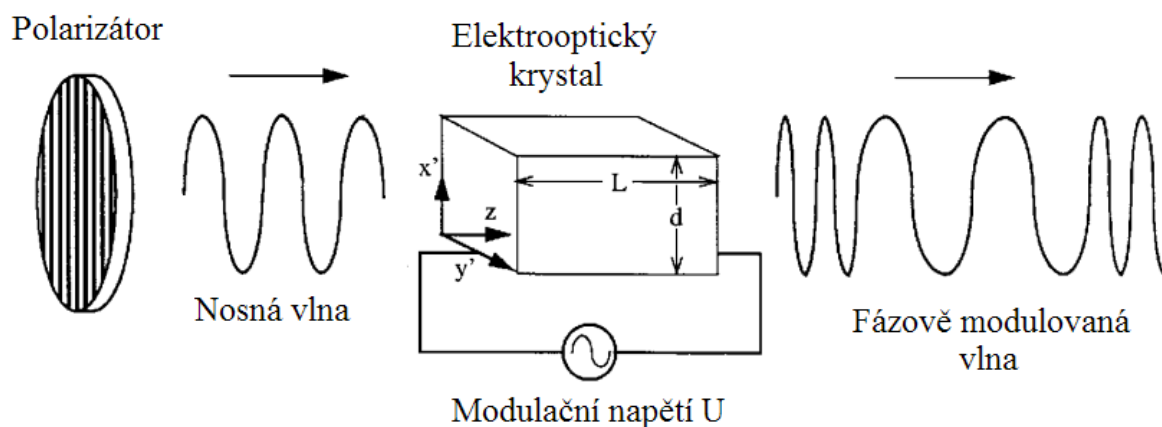
Obrázek 5.8: Elektrooptický modulátor: a) podélný, b) příčný

U podélného typu modulátoru je elektrické napětí přiložené rovnoběžně se světelnou vlnou. Elektrody musí být průhledné, jinak by světlo nemohlo modulátorem prostoupit. Materiálem elektrod proto bývá buď vrstva oxidu kovu (SnO, InO nebo CdO), nebo se do středu elektrod a koncích elektrooptického krystalu ponechá malý otvor. Velikost elektrického pole uvnitř krystalu je dán poměrem přiloženého napětí ku délce EO krystalu ( $E = U/L$ ). Následný vyvolaný fázový posun je pak úměrný napětí  $U$  a vlnové délky světla  $\lambda$ , kdežto fyzické rozměry zařízení nehrají roli. Tyto modulátory mohou mít velkou přijímací oblast a jsou užitečné v případě, že světelný paprsek má velkou plochu průřezu.

U příčného typu modulátoru je napětí přivedeno kolmo na směr šíření světla. Elektrody nebrání průchodu světla krystalem. Velikost elektrického pole  $E$  je dán vztahem  $E = U/d$ , kde snížení příčného rozměru  $d$  vede ke zvýšení elektrického pole při stejném přiloženém napětí. Vyvolaný fázový posun je nepřímo úměrný poměru stran. Proto napětí pro dosažení požadovaného stupně modulace lze výrazně snížit. Nicméně příčný rozměr  $d$  je omezen nárůstem kapacity, který má vliv na šířku pásma modulace, rychlost zařízení nebo difrakci pro danou délku  $L$ . [18]

### 5.3.1 Fázové modulátory

Nejjednodušší typem elektrooptických modulátorů je fázový modulátor, který se skládá pouze z Pockelsových cel, kde elektrické pole aplikované na krystal mění fázové zpoždění laserového paprsku. Polarizační stav světla se průchodem krystalu nemění, protože je zarovnán s některou z optických os krystalu pomocí polarizátoru (obrázek 5.9).



Obrázek 5.9: Fázový modulátor s polarizovaným světlem podle osy  $x$  při použitém modulačním napětí [18]

Vstupní intenzita elektrické pole  $E_{in\ x}$  s polarizovaným světlem k ose  $x'$  je dáno vztahem

$$E_{in\ x'}(t) = E_{in} \cos \omega t. \quad (5.22)$$

Intenzita elektrické pole optické vlny na výstupu krystalu o délce  $L = z$  je

$$E_{\text{out}}(t) = E_{\text{in}} \cos(\omega t - \varphi), \quad (5.23)$$

kde

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_{x'} + \Delta n_{x'}) L \quad (5.24)$$

je celkový fázový posun. Změnu indexu lomu  $\Delta n_{x'}$  vlivem přiloženého elektrického pole můžeme za použití Pockelsova koeficientu  $r$  přibližně vyjádřit jako

$$\Delta n_{x'} \approx \frac{1}{2} n_{x'}^3 r E. \quad (5.25)$$

Pokud se na problém podíváme z pohledu použitého stejnosměrného elektrického napětí na krystal, kde  $d$  je vzdálenost elektrod, pak vzniklé elektrické pole je dáno vztahem  $E = U/d$ . Fázový posun  $\varphi$  můžeme vyjádřit jako

$$\varphi = \varphi_0 - \pi \frac{U}{U_\pi}, \quad (5.26)$$

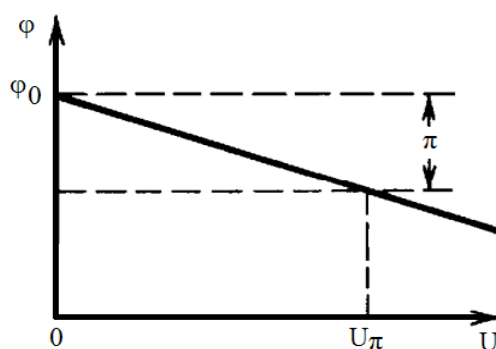
kde  $\varphi_0 = 2\pi n L / \lambda_0$  a  $U_\pi$  označujeme jako půlvlnné napětí, při kterém je fázový posun  $\Delta\varphi$  roven právě  $\pi$ . Velikost půlvlnného napětí můžeme vyjádřit jako

$$U_\pi = \frac{\lambda}{n_{x'}^3 r} \quad (5.27)$$

pro podélné modulátory a

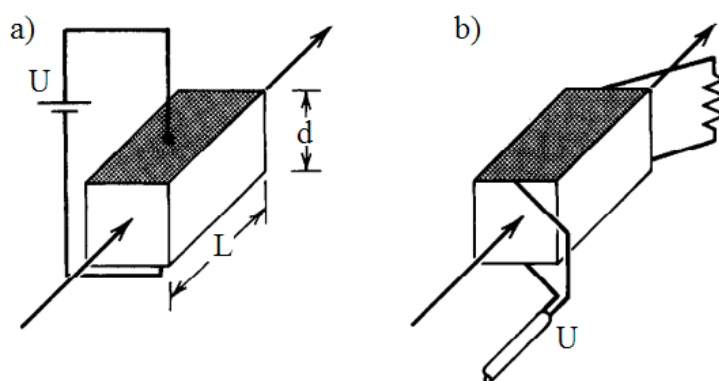
$$U_\pi = \frac{d}{L} \frac{\lambda}{n_{x'}^3 r} \quad (5.28)$$

pro modulátory příčné. Na níže uvedeném obrázku 5.10 vidíme závislost fázového posunu na elektrickém napětí s vyznačeným půlvlnným napětím.



Obrázek 5.10: Závislost fázového posunu na elektrickém napětí

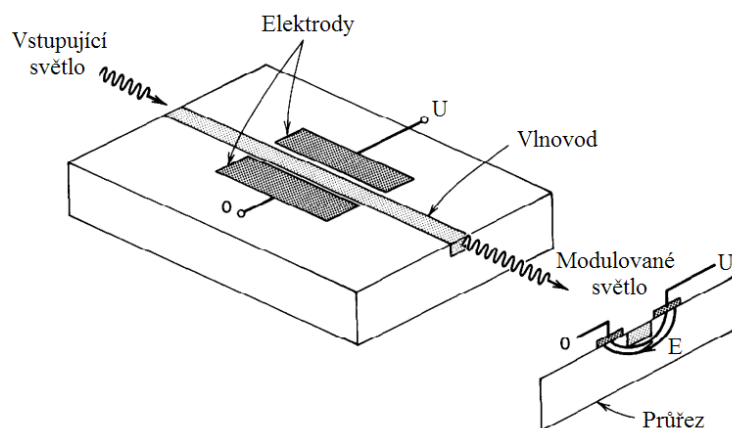
Rychlost s jakou může být elektrooptický modulátor provozován je silně omezená elektrickými kapacitními efekty a dobou průchodu světelného paprsku skrz materiál. Jestliže elektrické pole  $E(t)$  výrazně ovlivňuje čas  $T$  průchodu světla, tak postupující optická vlna bude ovlivňována různými elektrickými poli, které se vyskytují v krystalu. Modulovaná fáze v daném čase  $t$  je pak úměrná elektrickému poli  $E(t)$  v čase od  $t - T$  do  $t$ . V důsledku toho dochází k omezení modulační šířky pásma, která je přibližně  $1/T$ . Jedním způsobem jak snížit tuto dobu je použít tzv. modulátory s postupnou vlnou, kde elektrické napětí přiložíme pouze na jeden konec krystalu a elektrody použijeme jako přenosový prostředek (obrázek 5.11). Komerční modulátory, ať už příčné nebo podélné obvykle pracují na frekvencích řádově stovkách MHz. V dnešní době jsou však možnosti použití i několika GHz.



Obrázek 5.11: Rozdíl mezi: a) příčným modulátorem a b) příčným modulátorem s postupnou vlnou[22]

Elektrooptické fázové modulátory mohou být samozřejmě konstruovány v podobě zařízení integrované optiky. Takto konstruovaná zařízení pracují s mnohem vyššími rychlostmi s nutností použití menšího elektrického napětí. Optický vlnovod je vyroben ze substrátu např. z již dříve zmiňovaného materiálu  $\text{LiNbO}_3$  difuzí např. materiálu titánie pro zvýšení indexu lomu. Elektrické pole je aplikováno na vlnovod za použití elektrod (obrázek 5.12). U integrovaných fázových optických modulátorů se využívá příčná konfigurace. Je to z toho důvodu, že šířka vlnovodu je mnohem menší než délka ( $d \ll L$ ). Díky tomu je možné použít jen malou velikost pólů napětí (několik voltů). Takovéto modulátory pracují s kmitočty nad 100 GHz a pro spojování musí být použita optická vlákna.

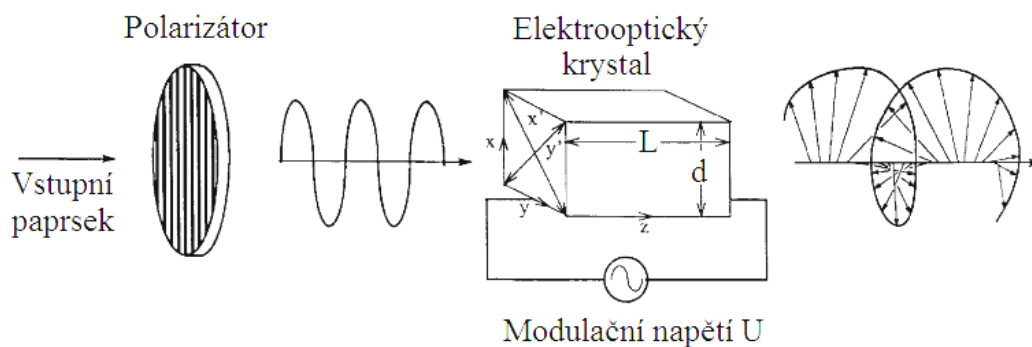




Obrázek 5.12: Opticky integrovaný fázový modulátor[22]

### 5.3.2 Polarizační modulátory

Polarizační modulace spočívá ve využití anizotropního prostředí, které při vedené dvou světelných ortogonálních vln dokáže měnit výstupní polarizaci. Někdy se polarizační modulátory v literatuře označují jako dynamické zpomalovací desky (dynamic retardation plate). Princip je velmi podobný jako u fázového modulátoru, kde základními prvky jsou vstupní polarizátor a elektrooptický anizotropní krystal, ve kterém se lineárně polarizovaná světelná vlna šíří jinou rychlostí v ose x a jinou rychlostí v ose y. Rozdíl od fázové modulace je v tom, že vstupní polarizátor je umístěn tak, že světelný vstup rozloží rovnoměrně mezi obě osy jak vidíme na obrázku 5.13.



Obrázek 5.13: Polarizační modulátor při použitím modulačním napětí[18]

Jestliže na materiál vykazující účinky Pockelsova jevu působí stabilního elektrického pole E, pak výsledné indexy lomu  $n_x$  a  $n_y$  jsou přibližně rovny

$$n_x(E) \approx n_x - \frac{1}{2} r_x n_x^3 E = n_x - \Delta n_x \quad (5.29)$$

a

$$n_y(E) \approx n_y - \frac{1}{2} r_y n_y^3 E = n_y - \Delta n_y, \quad (5.30)$$

kde  $n_x$  a  $n_y$  jsou indexy lomu krystalu bez přítomnosti elektrického pole a  $r_x$ ,  $r_y$  jsou příslušné elektrooptické pockelsovy koeficienty. Jak se dvě různé polarizace šíří v krystalu o délce  $L$  různými rychlostmi, tak fázové zpomalení (fázová retardace)  $\Gamma$  je dána

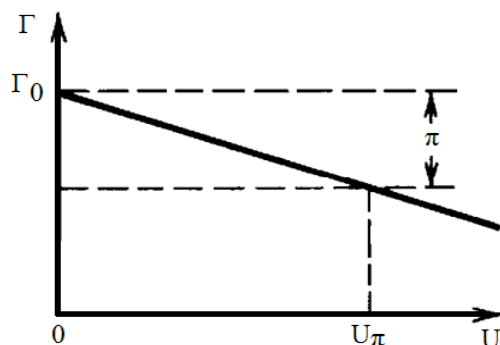
$$\begin{aligned}\Gamma &= \frac{2\pi}{\lambda}(n_x - n_y)L \\ &= \frac{2\pi}{\lambda}(n_x - n_y)L - \frac{\pi}{\lambda}(r_x n_x^3 - r_y n_y^3)EL = \Gamma_0 + \Gamma_i,\end{aligned}\quad (5.31)$$

kde  $\Gamma_0$  je přirozené fázové zpomalení (v nepřítomnosti aplikovaného napětí) a  $\Gamma_i$  je indukované fázové zpomalení úměrné přiloženému napětí.

Pro podélné modulátory (resp. příčné), kde je elektrické pole  $E = U/L$  (resp.  $E = U/d$ ) je indukované fázové zpomalení dáno vztahem

$$\Gamma_i = \frac{\pi}{\lambda}(r_y n_y^3 - r_x n_x^3)U \quad \text{resp.} \quad \Gamma_i = \frac{\pi}{\lambda}(r_y n_y^3 - r_x n_x^3)U \left(\frac{L}{d}\right) \quad (5.32)$$

Požadovaná výstupní polarizace, tedy výstupní fázové zpomalení je závislé na velikosti přiloženého napětí nebo délce krystalu. To zobrazuje níže uvedený obrázek 5.14. Na obrázku 5.15 pak vidíme vývoj jednotlivých polarizačních stavů pro různá fázová zpoždění vstupních lineárně polarizovaných světelných vln o stejné frekvenci ale jiných vlnových délkách.



Obrázek 5.14: Závislost fázového zpoždění na elektrickém napětí

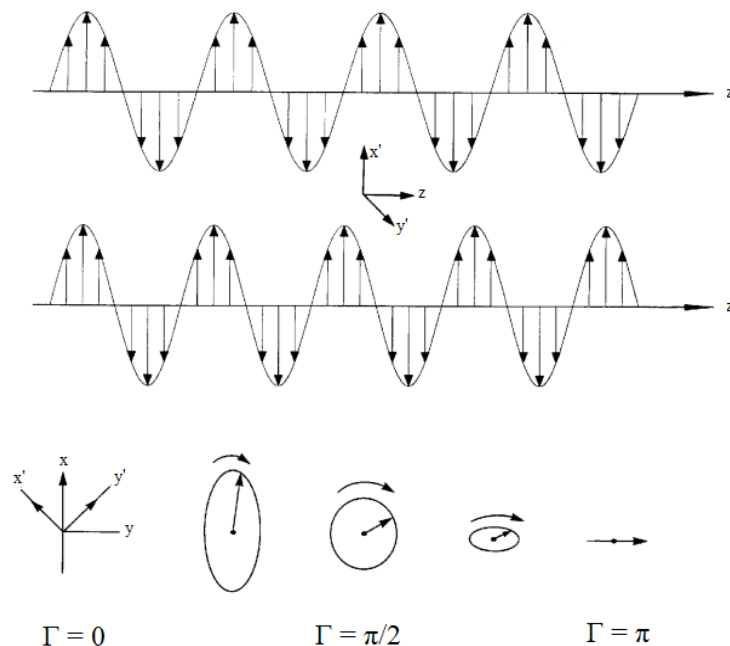
Podobně jako u fázových modulátorů platí i zde vztah

$$\Gamma = \Gamma_0 - \pi \frac{U}{U_\pi}, \quad (5.34)$$

kde napětí pro fázové zpoždění o velikosti  $\pi$  je dáno vztahem

$$U_\pi = \frac{\lambda}{r_x n_x^3 - r_y n_y^3} \quad \text{pro podélné modulátory resp.} \quad U_\pi = \frac{\lambda}{r_x n_x^3 - r_y n_y^3} \left(\frac{d}{L}\right) \quad (5.35)$$

pro příčné polarizační modulátory.[18][22]

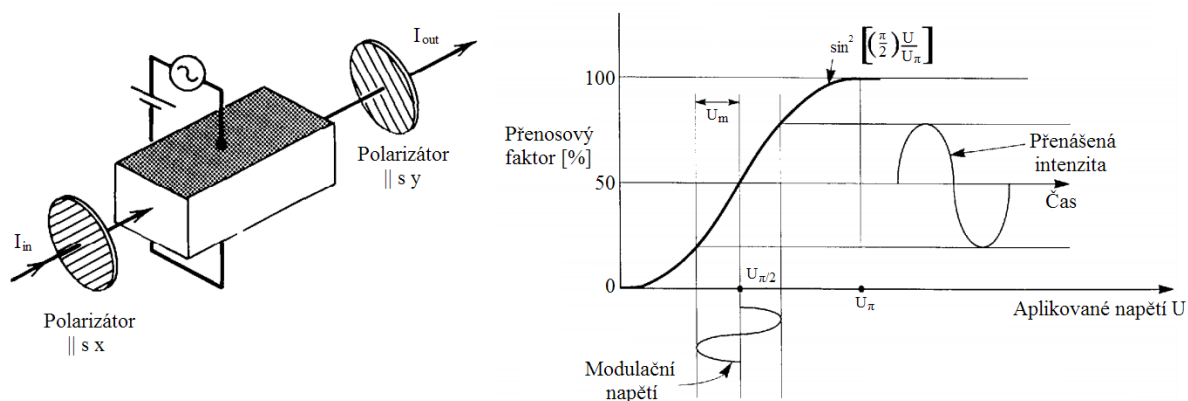


Obrázek 5.15: Vývoj polarizačních stavů modulátoru pro různá fázová zpoždění lineárně polarizovaných vln[18]

### 5.3.3 Intenzitní (amplitudové) modulátory

Optickou intenzitu (energii) světla můžeme modulovat několika způsoby. Prvním způsobem je využití dynamického optického zpomalení (retardace) s křížovým polarizátorem. Druhým způsobem může být využití retardéru s paralelním polarizátorem na výstupu. Třetím způsobem, a velmi často používaným, je využití fázového modulátoru, kde dochází k větvení světla, přičemž v jedné větvi dochází k fázovému posuvu vlny a druhá vlna zůstává stejná. Tento způsob využívá tzv. Mach-Zehnderova interferometru.

Intenzitní modulátor v konstrukci pomocí dynamického retardéru s křížovými polarizátory vidíme na obrázku 5.16.



Obrázek 5.16: Intenzitní modulátor s použitím dynamického retardéru a křížových polarizátorů

Přenos pro výše uvedený intenzitní modulátor je dán vztahem

$$F(U) = \sin^2\left(\frac{\Gamma}{2}\right) = \sin^2\left(\frac{\Gamma_0}{2} + \frac{\pi U}{2U_\pi}\right) \quad (5.36)$$

Pokud budeme chtít lineární modulaci, kde výstup signálu bude replikou modulačního napětí, musíme docílit fázového zpomalení  $\Gamma_0 = \pi/2$ . To lze udělat buď opticky, kdy umístíme za modulátor další zpomalovač (kompenzátor), nebo elektricky přidáním konstantního předpětí. Vychýlení fáze o  $\pi/2$  má za následek přenos  $F = 50\%$  v nepřítomnosti modulačního napětí.

V praxi nemůžeme nikdy dosáhnout stoprocentního přenosu z důvodů ztrát způsobených odrazy, rozptyly a absorpcí. Nicméně velikost přenosu bude také vždycky větší než 0%, protože musíme brát v úvahu různá vychýlení polarizátorů od polarizačních os apod.

Pro sinusová modulační napětí  $U = U_m \sin \omega_m t$  je retardace na výstupu z krystalu dána

$$\Gamma = \Gamma_0 + \Gamma_i = \frac{\pi}{2} + \Gamma_m \sin \omega_m t, \quad (5.37)$$

kde  $\Gamma_m = \pi U_m / U_\pi$  je amplitudový modulační index, neboli hloubka amplitudové modulace a  $U_\pi$  je půlvlnné napětí, o kterém byla řeč v předcházejících kapitolách. Přenos  $F$  je pak dán

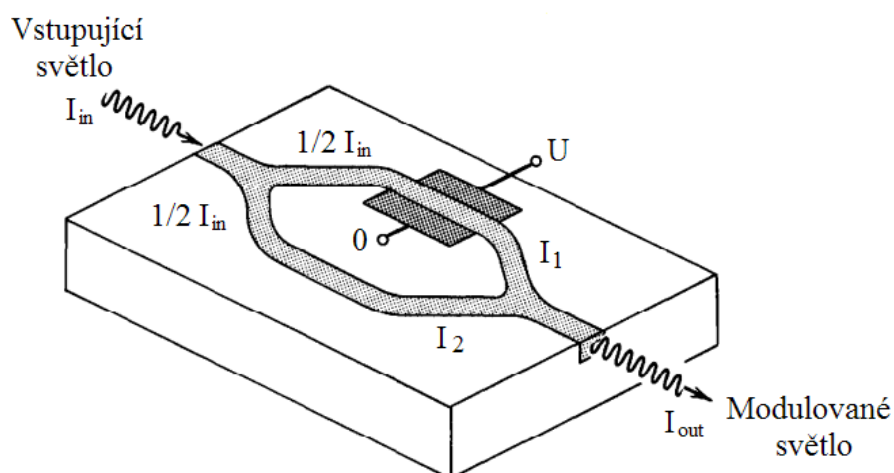
$$\begin{aligned} F(U) &= \sin^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\Gamma_m}{2} \sin \omega_m t\right) \\ &= \frac{1}{2} \left[ 1 - \cos\left(\frac{\pi}{2} + \Gamma_m \sin \omega_m t\right) \right]. \end{aligned} \quad (5.38)$$

Jestliže je modulační napětí malé ( $U_m \ll 1$ ), pak je malá i modulační hloubka ( $\Gamma_m \ll 1$ ) a přenos

$$F(U) = \frac{1}{2} [1 + \Gamma_m \sin \omega_m t]. \quad (5.39)$$

V případě, že je modulační napětí velké, tak na výstupu začne docházet ke zkreslení a začnou se objevovat liché vyšší harmonické.

Velkým zástupcem intenzitních modulátorů je již dříve zmiňovaný tzv. Mach-Zehnderův modulátor. Ten vzniká tak, že umístíme do jedné jeho větve fázový modulátor (obrázek 5.17).



Obrázek 5.17: Optický intenzitní modulátor (Mach-Zehnderův)[22]

Výstupní intenzita světla Mach-Zehnderova modulátoru je dána jako

$$I_{out} = I_1 + I_2 = \frac{1}{2} [I_{in} \cos \Gamma_0 + i_{in}] = I_{in} \cos^2 \left( \frac{\Gamma_0}{2} \right), \quad (5.40)$$

kde  $\Gamma_0$  je relativní fázový posuv mezi dvěma větvemi. Přenos je pak určen jako

$$F = \frac{I_{out}}{I_{in}} = \cos^2 \left( \frac{\Gamma}{2} \right). \quad (5.41)$$

## 6 Statické a dynamické charakteristiky

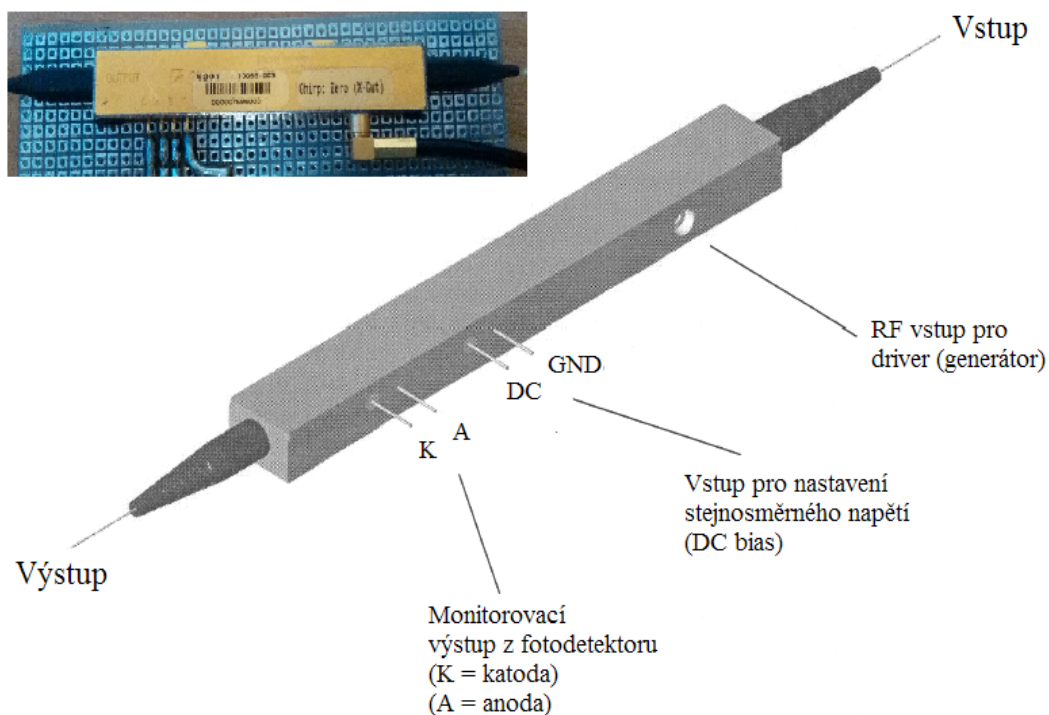
### 6.1 Základní komponenty měření

Základními komponenty (prvky) pro statická a dynamická měření, kde budeme proměřovat vlastnosti Mach-Zehnderova modulátoru jsou:

- Mach-Zehnderův (intenzitní) modulátor
- DFB laserová dioda
- Izolátor
- Zdroj stejnosměrného napětí
- Optický měřič výkonu
- Signálový generátor s osciloskopem

#### 6.1.1 Mach-Zehnderův modulátor

Jedná se o lithium niobát intenzitní modulátor od firmy Covega (obrázek 6.1). Tento modulátor je založený na Mach-Zehnderově dvouramenném interferometrickém principu a hodí se pro použití např. pro dálkové DWDM aplikace, podmořské komunikace, rozhraní internet-router apod.



Obrázek 6.1: Popis intenzitního Mach-Zehnderova modulátoru

Kromě vstupu a výstupu optického signálu obsahuje modulátor RF vstup pro řízení. V našem případě, u proměrování dynamických charakteristik, řízení signálovým generátorem. Dalším vstupem je velmi důležitý vstup DC bias (vstup stejnosměrného napětí), pomocí kterého budeme měnit fázový posuv signálu v jedné větvi modulátoru a tím pádem i výstupní intenzitu. Poslední částí modulátoru je výstup z integrovaného fotodetektoru. Ten vznikl jako požadavek zákazníků na modulátory s malým činitelem tvaru (form-factor), aby mohli implementovat tzv. FEC (Forward error correction). Kromě toho detektor poskytuje zpětnou vazbu při monitorování výstupního výkonu, který nastavujeme stejnosměrným napětím (DC bias control).

### **Katalogové hodnoty:**

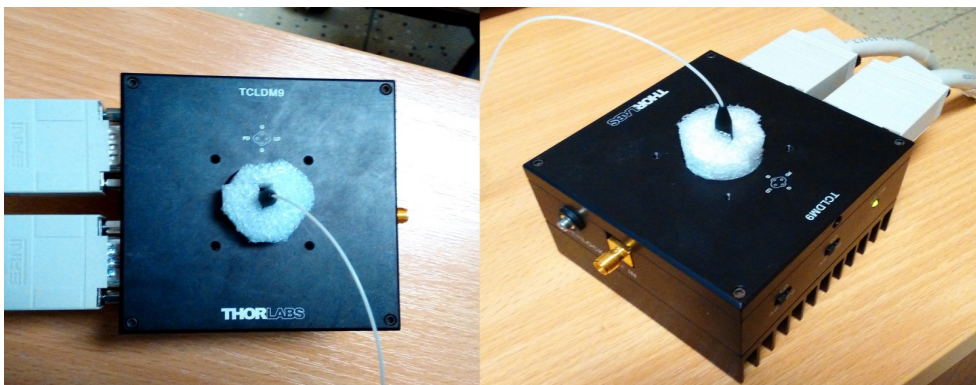
*Tabulka 6.1: Přehled hlavních katalogových parametrů modulátoru*

Parametr	Min	Typ	Max	Jednotka
Provozní teplota	0		70	°C
Provozní vlnová délka	1525		1605	nm
Optický vložný útlum		4	5	dB
Optický útlum odrazu	40			dB
Frekvenční bit rate	9,953		12,5	Gb/s
Šířka pásma	10/12			GHz
Napětí RF vstupu		5,5	6	V
DC napětí (Bias)	-8		8	V
Citlivost fotodetektoru	0,1		0,5	A/W

Ve výše uvedené tabulce vidíme základní katalogové hodnoty Mach-Zehnderova elektrooptického modulátoru. Výrobce deklaruje, že provozní teplota se má pohybovat v rozmezí od 0 do 70°C. Tuto katalogovou hodnotu budeme podrobněji zkoumat později, zda-li opravdu při větších teplotách je zařízení schopno nadále pracovat, jelikož elektrooptický krystal je poměrně náchylný na vliv teploty. Měření bude probíhat na vlnové délce pro standardní jednomódový režim, což je 1550 nm. Optický vložný útlum by neměl přesáhnout hodnotu 5 dB, zatímco optický útlum odrazu by měl být co nejvyšší a minimální deklarovaná hodnota je 40 dB, což je pro běžné používání velmi dobrá hodnota. Přenosová frekvence (bit rate) je v rozmezí od 9,953 do 12,5 Gb/s. Tomu také odpovídá šířka přenosového pásma (10 – 12 GHz). Velmi důležitými parametry jsou maximální přivedená napětí jak na RF vstup, kde bychom u měření dynamických vlastností neměli přesáhnout 6 V, tak také na vstup DC bias, kde se můžeme pohybovat maximálně v rozmezí od -8 do 8 V. Vyšší hodnoty by mohly mít nepříznivý účinek na celé zařízení. Posledním parametrem v tabulce je citlivost integrovaného fotodetektoru, jehož hodnota by měla být od 0,1 do 0,5 A/W (mA/mW).

### 6.1.2 DFB laserová dioda

Další důležitou součástí pro měření statických a dynamických charakteristik je DFB laserová dioda (obrázek 6.2). Jedná se o hermeticky uzavřenou diodu (modul) s pigtailem s konektorovým zakončením typu FC/APC. Vlnová délka diody je 1550 nm a výstupní výkon se pohybuje okolo 2 mW. V datasheetu je uváděná pracovní teplota od -20 do 85°C, nicméně z praxe víme, že se vzrůstající teplotou výkon klesá a vlnová délka, která by měla být stabilní, kolísá.



Obrázek 6.2: DFB laserová dioda

Na výše uvedeném obrázku si můžeme všimnout, že dioda je umístěna v přípravku Thorlabs TCLDM9, což je přípravek pro teplotní stabilitu diody, která je velmi důležitá při měření s Mach-Zehnderovým modulátorem, protože každá odchylka ve spektru diody se projeví na výstupním optickém svazku vycházejícím z modulátoru. Pro kontrolu teploty a nastavení pracovního bodu laserové diody se využívá přístroje TED 200 C, což je teplotní kontrolér, kde pomocí tlačítka  $T_{SET}$  nastavíme požadovanou teplotu a tato teplota je stabilní po celou dobu měření. Přístroj LDC 205 C je naopak kontrolér laserové diody. Na tomto přístroji nastavujeme proud tekoucí diodou, popř. její výkon. Oba přístroje vidíme na níže uvedeném obrázku 6.3.



Obrázek 6.3: Teplotní kontrolér Thorlabs TED200C a kontrolér laserové diody Thorlabs LDC205C



### **Katalogové hodnoty:**

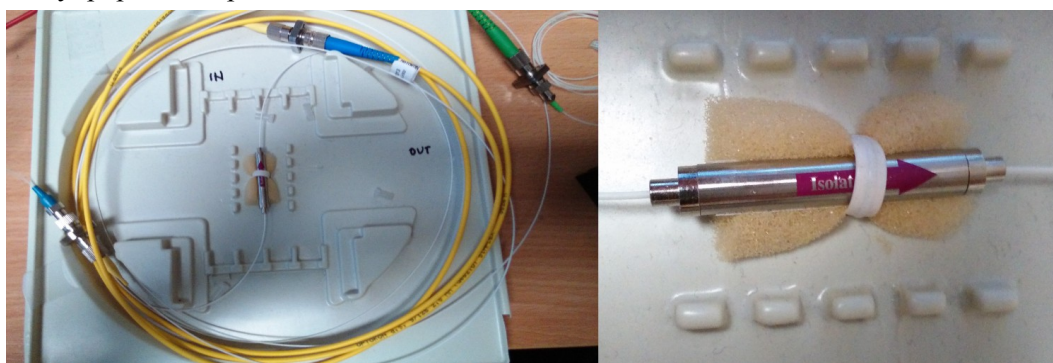
*Tabulka 6.2: Přehled hlavních katalogových parametrů laserové diody*

Parametr	Min	Typ	Max	Jednotka
Provozní teplota	-20		85	°C
Prahový proud		8	15	mA
Pracovní napětí		1,1	1,5	V
Pracovní proud ( $P = 2 \text{ mW}$ )		25	50	mA
Pracovní vlnová délka	1530	1550	1570	nm
Doba náběžné/sestupné hrany			0,2	ns
Mezní frekvence		3		GHz

Ve výše uvedené tabulce máme přehled základních parametrů DFB laserové diody. O provozní teplotě už byla řeč výše. Dalšími parametry jsou prahový proud, při kterém dioda začíná pracovat je cca 8-15 mA. Je dobré tuto hodnotu přesáhnout pro vyšší stabilitu. Pracovní napětí se pohybuje v rozmezí od 1,1 do 1,5 V v závislosti na přiloženém proudu, který se může maximálně vyšplhat až do hodnoty 50 mA. Pro naše měření byla hodnota pracovního proudu zvolena na 30 mA. Pracovní vlnová délka se pohybuje od 1530 do 1570 nm, ale pokud zachováme stabilní teplotu, měla by být konstantní a pohybovat se kolem 1550 nm. Dalšími parametry jsou doba náběžné a sestupné hrany, která je 0,2 ns a mezní frekvence, při které by DFB dioda měla být schopna pracovat dle katalogových hodnot je 3 GHz.

### **6.1.3 Izolátor**

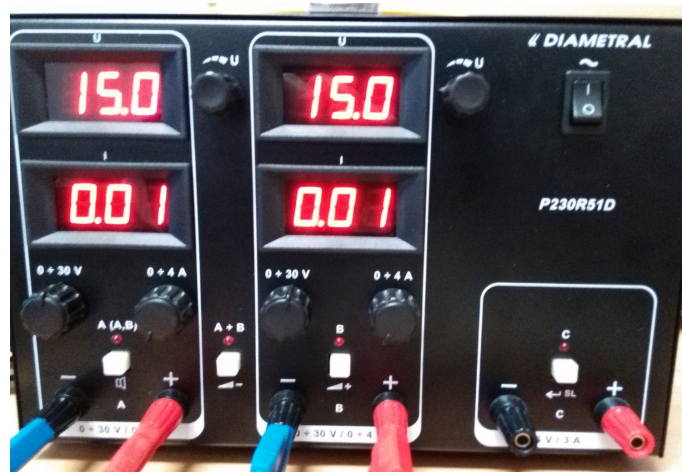
Dalším prvkem měřicího pracoviště, a komponenta umístěna hned za laserovou diodou je izolátor (obrázek 6.4). Tento prvek je velmi důležitý, protože brání odraženému světlu od konektorů a jiných přechodů aby se dostalo zpátky do laserové diody. Odražený světelný svazek by nepříznivě ovlivňoval spektrum laseru a mohlo by docházet k přeladování, což je nežádoucí. Základní princip izolátoru byl popsán v kapitole 3.1.



*Obrázek 6.4: Izolátor*

#### 6.1.4 Zdroj stejnosměrného napětí

Zdroj stejnosměrného napětí je velmi důležitá komponenta (obrázek 6.5). Pomocí něj budeme napájet obvod pro plynulou regulaci napětí, které přivedeme na modulátor, abychom docílili změny fázového posunu.



Obrázek 6.5: Zdroj stejnosměrného napětí Diametral

Laboratorní zdroj od firmy Diametral je vybaven dvěma zdroji s plynulou regulací napětí v rozsahu  $0 \div 30\text{V}$  s možností nastavení omezení proudu od  $0.1 \div 4\text{A}$ . Tento model disponuje navíc pevným zdrojem napětí  $5\text{V}/3\text{A}$ . Regulovatelná část zdroje je vybavena měřicími přístroji jak pro napětí, tak i pro proud. Indikace omezení proudu je provedena blikající desetinnou tečkou na příslušném proudovém měřicím přístroji a přerušovaným zvukovým signálem. Výstupy jednotlivých zdrojů jsou ovládány samostatným tlačítkem s kontrolkou pro jejich jednoduchou obsluhu. Díky tomu není nutno vypínat celý laboratorní zdroj při práci. Dále je navíc vybaven tlačítkem pro spojení regulovatelných zdrojů do jednoho symetrického zdroje.

#### 6.1.5 Optický měřič výkonu

Toto zařízení (obrázek 6.6) umístíme na výstup z Mach-Zehnderova modulátoru. Pomocí něj budeme sledovat změny výstupního výkonu, který je závislý na přiloženém stejnosměrném napětí (u statických měření).



Obrázek 6.6: Optický měřič výkonu Thorlabs

### 6.1.6 Signálový generátor s osciloskopem

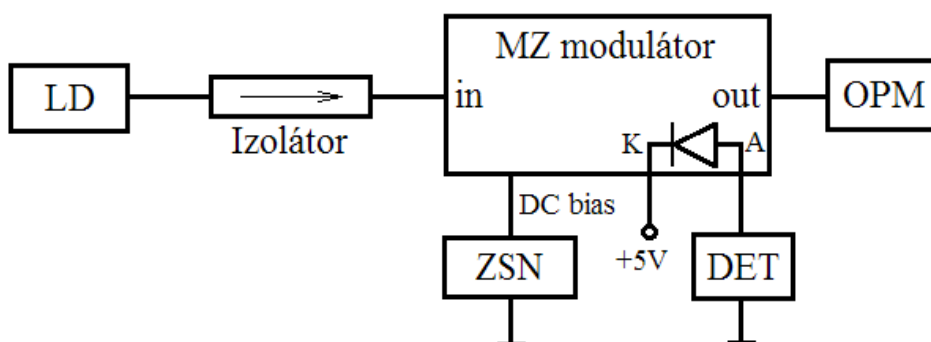
Zařízení, které budeme používat pro sledování průběhů při měření dynamických charakteristik je digitální dvoukanálový osciloskop Agilent DSO-X 2012A (obrázek 6.7). Tento přístroj v sobě obsahuje také generátor signálů s možností regulace frekvencí od 100 mHz do 20 MHz. Rozsah se může měnit podle použití tvaru generovaného signálu.



Obrázek 6.7: Digitální dvoukanálový osciloskop Agilent DSO-X 2012A

## 6.2 Měření statických charakteristik

Nyní přikročíme k měření statických charakteristik. Statickými charakteristikami se myslí závislost výstupního výkonu Mach-Zehnderova modulátoru na přiloženém stejnosměrném napětí na vstupu DC bias, tedy ovlivňování fázového posunu jedné větve modulátoru. Z teorie skládání vln víme, že pokud vlny v obou větvích mají stejnou fázi, dojde na výstupu k jejich sčítání (konstruktivní skládání vln) a amplituda poroste. Pokud naopak ovlivníme jednu větev dostatečným elektrickým polem, můžeme díky elektrooptickému jevu posunout fázi o hodnotu  $\pi$ . Díky tomuto posunu bychom pak v ideálním případě dostali na výstupu nulovou hodnotu optického výkonu (destruktivní skládání vln). Zapojení měřicího pracoviště vidíme na níže uvedeném obrázku 6.8.

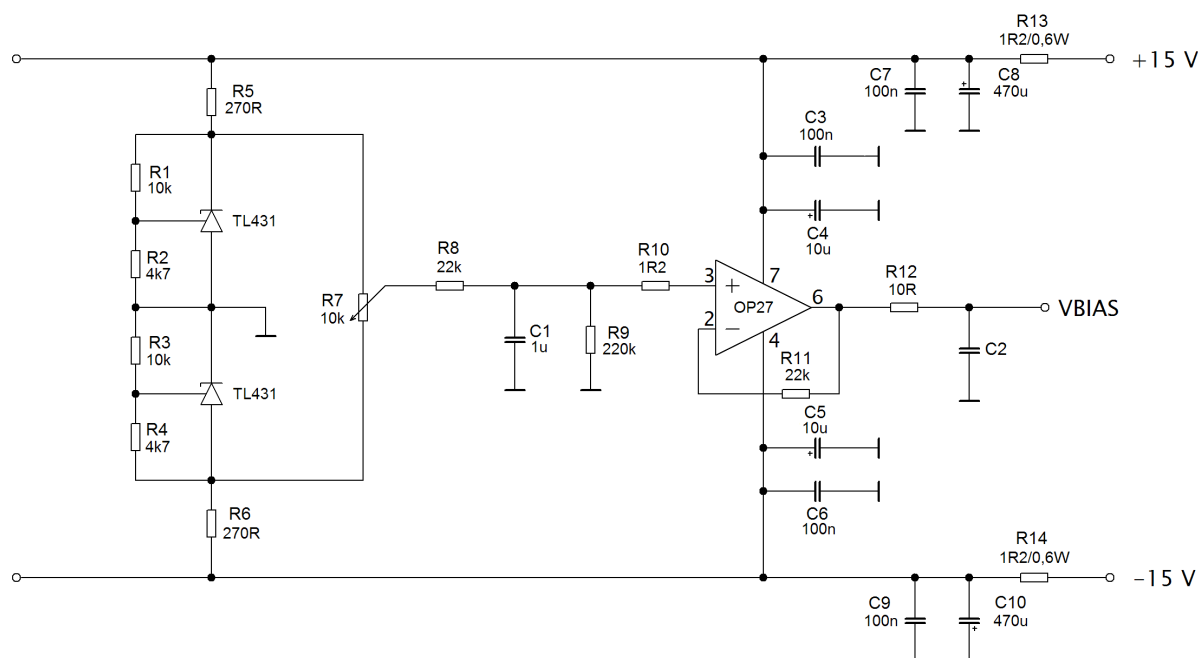


Obrázek 6.8: Zapojení pro měření statických charakteristik

DFB laserovou diodou vysíláme do modulátoru výkon okolo 2 mW. Tomu odpovídá proud diody cca 30 mA. Optický svazek je vedený přes izolátor. Změnu optického výkonu po průchodu modulátorem odečítáme na optickém měřiči výkonu OPM. Víme, že modulátor má v sobě zabudovaný fotodetektor, ze kterého budeme snímat hodnotu napětí pro různý stupeň modulačního výkonu. Další velmi podstatnou částí zapojení je zdroj stejnosměrného napětí ZSN. Jelikož elektrooptický materiál je velmi citlivý na změny elektrického pole a na náš modulátor můžeme přivést napětí maximálně od -8 do 8 V, musíme dávat velký pozor na nastavování požadovaného napětí. Toto napětí tedy z důvodu bezpečnosti tedy nebudeme regulovat pomocí zdroje, ale zkonstruujeme si obvod pro velmi plynulou regulaci.

### 6.2.1 Návrh obvodu pro plynulou regulaci napětí

Obvod pro plynulou regulaci stejnosměrného napětí (obrázek 6.9) je velmi důležitá část zapojení pro měření statických charakteristik modulátoru.



Obrázek 6.9: Obvod pro plynulou regulaci stejnosměrného napětí DC bias

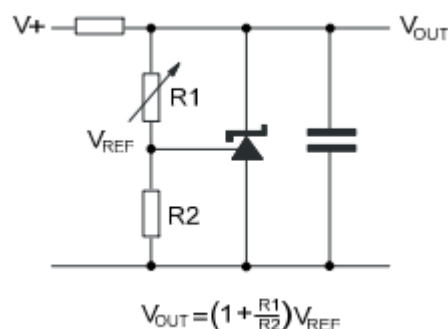
Výše uvedené schéma napájíme stejnosměrným napětím o velikosti +/-15 V, které dále filtrujeme kondenzátory. V základu tento elektronický obvod obsahuje dva regulovatelné obvody TL431, což jsou součástky chovající se na principu stabilizačních Zenerových diod, nicméně s lepšími parametry, jako je lepší teplotní stabilita nebo maximální použitelné proudy, které výrobce deklaruje na 100 mA. Obvod TL431 má kromě vývodů katody a anody ještě třetí vývod, který je určený právě pro regulaci výstupního napětí. Toto napětí můžeme nastavit od 2,5 V až do 36 V. Regulace napětí se provádí pomocí dvou pevných rezistorů, popř. jedním rezistorem proměnným a druhým pevným, pokud bychom chtěli docílit regulovatelnosti výstupního napětí. V našem případě použijeme dva rezistory o pevných hodnotách a celý systém budeme nastavovat jemně laditelným, více otáčkovým

potenciometrem. Pro výpočet hodnot součástek bude zapotřebí znát základní katalogové údaje obvodu TL431. Ty vidíme v tabulce níže.

*Tabulka 6.3: Přehled hlavních katalogových parametrů obvodu TL431*

Parametr	Min	Typ	Max	Jednotka
Provozní teplota	-40		125	°C
Napětí katody	$V_{REF}$		36	V
Proud katody $I_{KA}$	1		100	mA
Referenční napětí $V_{REF}$ pro $I_{KA} = 10\text{mA}$	2,470	2,495	2,520	V
Výstupní impedance		0,2	0,5	$\Omega$

Jedním z důležitých parametrů je parametr referenčního napětí  $V_{REF}$ . Pro určení stabilizačního napětí vycházíme z datasheetu, kde výrobce uvádí základní zapojení obvodu TL431 pro regulaci výstupního napětí. Toto zapojení vidíme na obrázku 6.10.



*Obrázek 6.10: Nastavení výstupního napětí obvodu TL431*

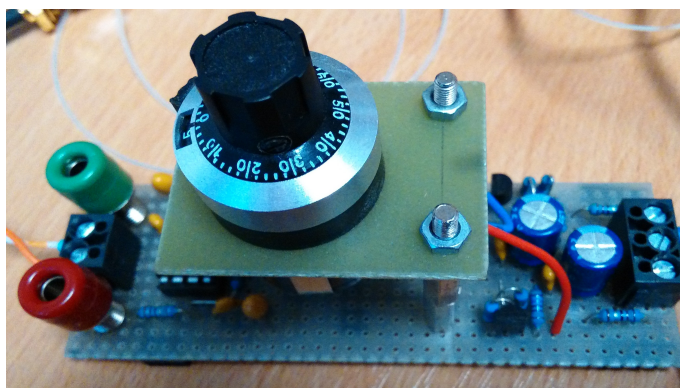
K tomuto zapojení se váže i vzorec pro výpočet požadovaných hodnot. Víme, že na elektrooptický modulátor můžeme přivést maximálně napětí  $\pm 8\text{V}$ . Tohoto poznatku využijeme při návrhu. Další hodnotu co známe je napětí  $V_{REF}$  mezi odpory  $R1$  a  $R2$  (resp.  $R3$  a  $R4$ ). Zvolíme si hodnotu rezistoru  $R1$  (resp.  $R3$ ) na  $10\text{ k}\Omega$  a můžeme dopočítat rezistor  $R2$  (resp.  $R4$ ) po vyjádření ze vzorce z obrázku.

$$R2 = \frac{R1}{\frac{V_{OUT}}{V_{REF}} - 1} = \frac{10\text{ k}\Omega}{\frac{8\text{ V}}{2,495\text{ V}} - 1} = 4,53\text{ k}\Omega \rightarrow \text{volíme } 4,7\text{ k}\Omega \quad (6.1)$$

Po určení stabilizačního napětí je třeba celý okruh s obvodem TL431 nějakým způsobem regulovat. K tomu slouží proměnný rezistor  $R7$  o velikosti  $10\text{ k}\Omega$ . Tímto rezistorem budeme měnit výstupní napětí DC Bias dle požadovaných hodnot. Dále v obvodu následuje RC filtr (rezistor  $R8$  a kondenzátor  $C1$ ) přes který se dostáváme na neinvertující vstup nízkošumového, vysokorychlostního operačního zesilovače OP27, který je zapojený jako napěťový sledovač. Ten se jeví jako ideální zdroj



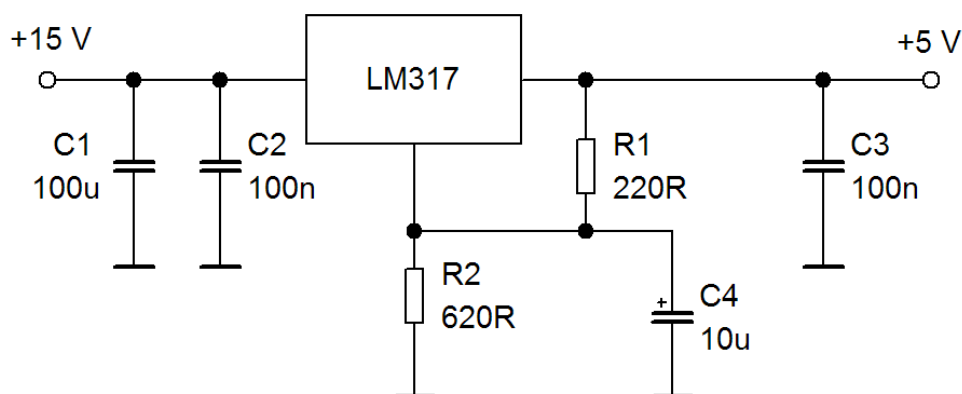
napětí, takže hodnotu napětí, kterou přivedeme na vstup dostaneme na výstupu. Takže operační zesilovač OP27 nezesiluje, ale pomocí něj jsme schopni obvod impedančně přizpůsobit. Výstup z operačního zesilovače následně přes filtr přivádíme na vstup DC bias elektrooptického modulátoru. Celé zařízení můžeme vidět na níže uvedeném obrázku 6.11. Všimněme si, že kromě výstupu na modulátor jsou připojeny na regulátor napětí výstupní svorky. Tyto svorky jsou určeny pro měřič napětí (multimetr), pomocí kterého zjišťujeme úroveň přivedeného napětí.



Obrázek 6.11: Řízení pro nastavení stejnosměrného napětí DC bias

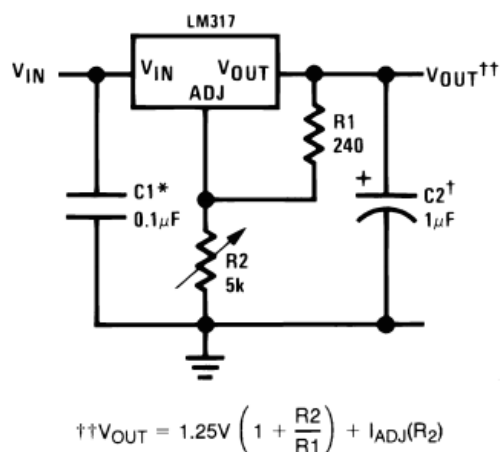
### 6.2.2 Návrh obvodu pro fotodetektor

Na integrovaný fotodetektor modulátoru musíme přivést napětí 5 V. Jelikož máme k dispozici pouze jeden laboratorní zdroj a na něm nastavené hodnoty  $\pm 15$  V je třeba využít dalšího stabilizátoru. Schéma vidíme na obrázku 6.12.



Obrázek 6.12: Obvod pro stabilizaci napětí pro integrovaný fotodetektor

Jako stabilizátor využíváme integrovaný obvod LM317, u kterého máme možnost nastavit výstupní napětí. Stabilizátor má tři vývody a je k dostání v různých pouzdrech. Výstupní napětí je nastavitelné v rozsahu 1,25 V až 37 V, přičemž rozdíl mezi vstupním napětím a výstupním napětím nesmí překročit 40 V, ale současně nesmí být menší než 3 V. Integrovaný obvod má vnitřní ochranu proti proudovému přetížení, kdy obvod omezí výstupní proud a sníží výstupní napětí na hodnotu 1,25 V. Za tohoto stavu však integrovaný obvod generuje velké množství tepla, a proto potřebuje adekvátní chlazení. Pro nastavení výstupního napětí využijeme poznatků z datasheetu (obrázek 6.13).



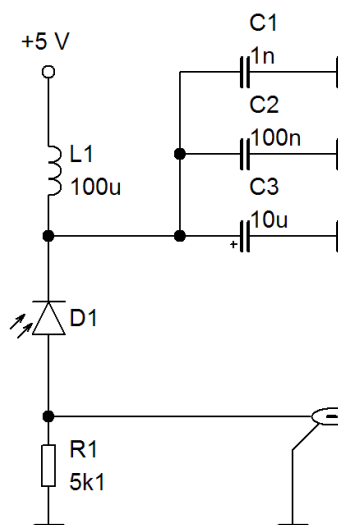
Obrázek 6.13: Regulace napětí stabilizátoru LM317

Výrobce deklaruje, že velikost rezistoru R1 má být kolem 240 Ω. V našem případě volíme R1 na 220 Ω. Dle výše uvedeného vztahu na obrázku 6.13 vyjádříme hodnotu rezistoru R2, abychom na výstupu dostali napětí 5V, přičemž velikost proudu  $I_{ADJ}$  se podle údajů výrobce pohybuje okolo 0,1 mA.

$$R2 = \frac{\frac{V_{OUT}}{1.25} - 1}{\frac{1}{R1} + I_{ADJ}} = \frac{\frac{5V}{1.25} - 1}{\frac{1}{220\Omega} + 0,1mA} = 645,79\Omega \rightarrow \text{volíme } 620\Omega \quad (6.2)$$

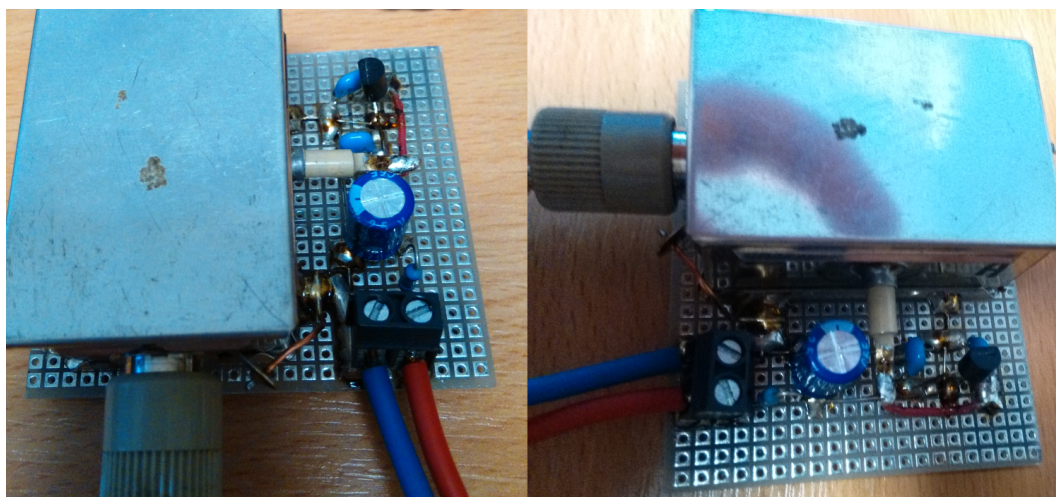
Hodnotu rezistoru R2 tentokrát volíme nižší, protože nechceme, aby nám výstupní napětí přesáhlo 5V.

Výstup ze stabilizátoru napětí přivedeme přes tlumivku (která měla mnohem lepší vlastnosti, než původně zamýšlený odpor) jako napájení fotodetektoru (obrázek 6.14). Rezistor R1 slouží jako snímací odpor, ze kterého budeme snímat napětí, které přes stíněný kabel přivedeme na měřicí přístroj.



Obrázek 6.14: Obvod pro snímání napětí z integrovaného fotodetektoru

Výše uvedené obvody jsou umístěny na desce plošných spojů (obrázek 6.15), kde mezi stabilizátorem napětí a snímacím obvodem, který je umístěný v kovovém pouzdře je tzv. průchodkový kondenzátor.



Obrázek 6.15: Stabilizátor napětí a snímací obvod fotodetektoru v kovovém pouzdře

### 6.2.3 Odměření statické charakteristiky

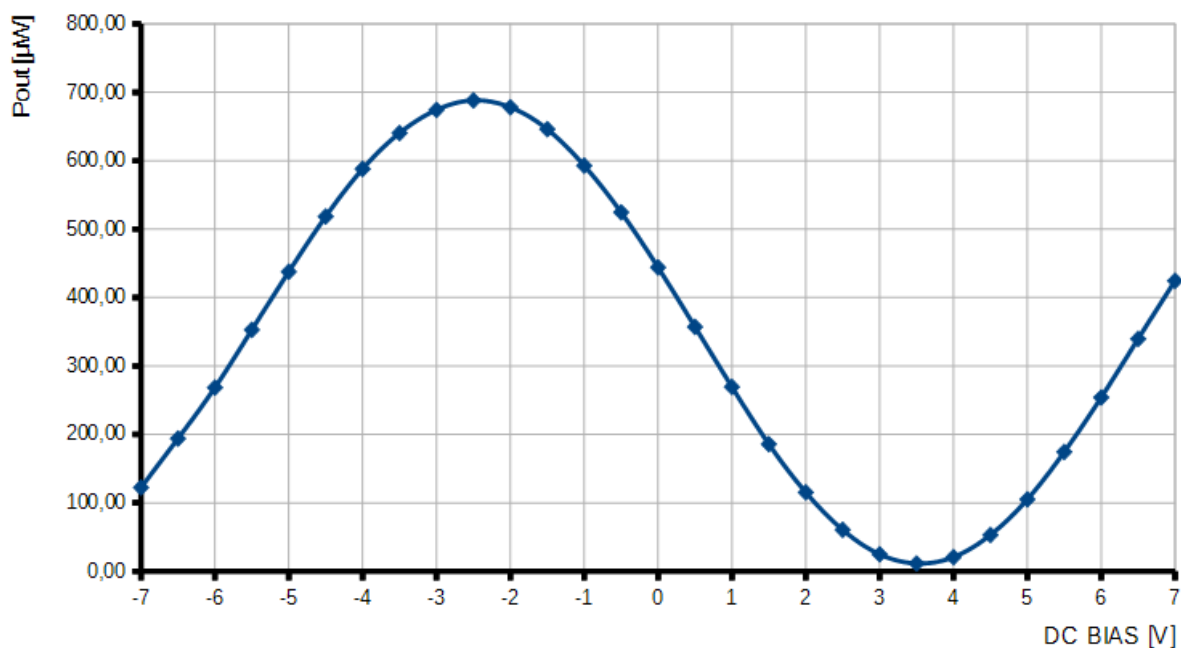
Samotné měření statických charakteristik probíhá takto. Zapojíme veškeré komponenty dle schématu. Přitom dbáme na čistotu optických konektorů. Pokud by byly konektory špinavé, docházelo by ke zkreslení výsledků měření. Pro očištění vláken používáme speciální ubrousky a izopropyl alkohol. Po zapojení a očištění vláken nastavíme požadovaný proud laserové diody na 29,9 mA a správnou pracovní teplotu diody, tj. 25°C. To vše pomocí teplotního kontroléru Thorlabs TED200C a kontroléru laserové diody Thorlabs LDC205C. Do optického modulátoru nám nyní přichází optický svazek o výkonu cca 2,07 mW. Na potenciometru zařízení pro plynulou regulaci stejnosměrného napětí nastavujeme napětí od -7 V do +7 V s krokem 0,5 V pro detailnější charakteristiku a sledujeme chování výstupního výkonu, který odečítáme z optického měřiče výkonu Thorlabs. Dále sledujeme výstupní napětí na integrovaném detektoru Udet, které se mění v závislosti na úrovni modulace, tedy na velikosti vystupujícího optického výkonu. Měření jsme prováděli 15 krát. Je to z toho důvodu, že elektrooptický materiál je velice citlivý na jednotlivé změny elektrického pole, resp. napětí a tudíž nám při měření vznikaly odchylky, které kompenzujeme právě větším počtem měření a statistickým zpracováním, kdy výsledné hodnoty jsou dány aritmetickým průměrem ze všech měření ve stejném bodě měření (pro stejnou hodnotu napětí DC bias). V níže uvedené tabulce 6.4 jsou naměřené hodnoty a z těchto hodnot byl sestaven graf závislosti výstupního výkonu na stejnosměrném napětí, který je na obrázku 6.16, dále pak graf závislosti napětí na detektoru na stejnosměrném napětí (obrázek 6.17), a také graf závislosti napětí na detektoru na výstupním optickém výkonu (obrázek 6.18). Všechny naměřené hodnoty a tabulky, ze kterých byly zpracovány ty níže uvedené můžeme najít v příloze A.



Tabulka 6.4: Naměřené hodnoty závislosti pro statické charakteristiky

DC bias [V]	Pout [ $\mu$ W]	Udet [mV]	DC bias [V]	Pout [ $\mu$ W]	Udet [mV]
-7	122,44	954,78	0,5	357,22	625,15
-6,5	193,98	859,53	1	269,47	746,14
-6	268,48	750,18	1,5	185,88	868,01
-5,5	352,90	628,76	2	115,37	963,71
-5	437,81	509,70	2,5	60,54	1040,18
-4,5	518,50	397,06	3	24,85	1088,48
-4	570,03	303,46	3,5	11,43	1107,19
-3,5	640,53	238,01	4	20,70	1094,24
-3	674,37	196,06	4,5	53,09	1045,24
-2,5	688,23	183,09	5	105,07	972,24
-2	678,14	197,77	5,5	174,47	875,93
-1,5	646,09	242,77	6	254,04	759,20
-1	592,89	310,45	6,5	339,69	641,82
-0,5	524,62	398,21	7	424,59	527,31
0	444,10	508,62			

Závislost výstupního výkonu Pout na stejnosměrném napětí DC bias



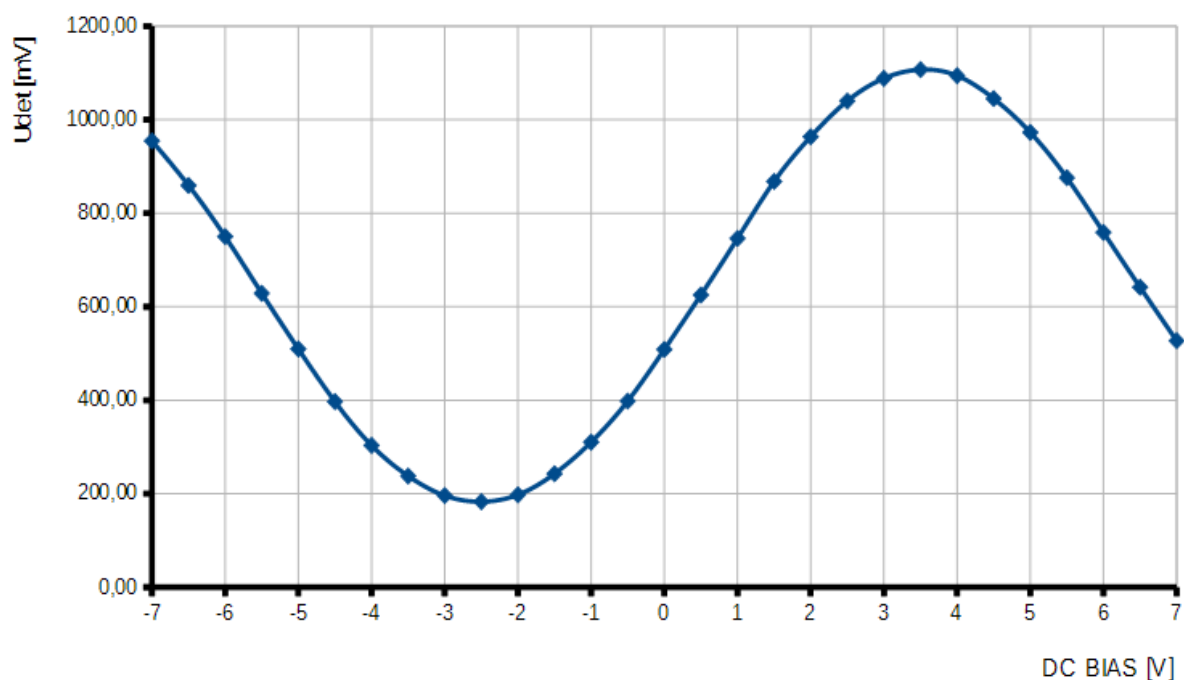
Obrázek 6.16: Graf závislosti výstupního výkonu Pout na stejnosměrném napětí DC bias

Z výše uvedené tabulky hodnot a grafu vidíme, že jsme dosáhli dvou mezních situací. První mezní situace nastává při napětí cca -2,5 V, kde dochází k maximálnímu výstupnímu výkonu, tzn. že světelné svazky obou větví Mach-Zehnderova modulátoru mají stejnou fázi. Druhá mezní situace nastává při napětí cca 3,5 V, kdy jsme na výstupu naměřili jen minimální optický výkon a tudíž můžeme říct, že při tomto napětí dochází v jedné větvi k fázovému posunu o hodnotu  $\pi$  a na výstupu modulátoru dojde k odečtení optického výkonu. Dále si můžeme všimnout, že díky materiálu LiNbO<sub>3</sub> použitého v modulátoru, u kterého se využívá lineárního Pockelsova elektrooptického jevu, dochází mezi oběma mezními situacemi k lineárním změnám, tzn. že křivka má mezi vrcholy téměř lineární charakter. Co se týká hodnot výstupního optického výkonu, z tabulky a grafu vidíme, že velikosti se pohybují maximálně do 700  $\mu$ W. Přitom si musíme uvědomit, že vstupní optický výkon byl 2,07 mW. Vložný útlum modulátoru tedy spočteme dle níže uvedeného vztahu 6.3.

$$A[dB] = 10 \log \frac{P_{in}}{P_{out}} = 10 \log \frac{2,07 mW}{0,7 mW} = 4,7 dB \quad (6.3)$$

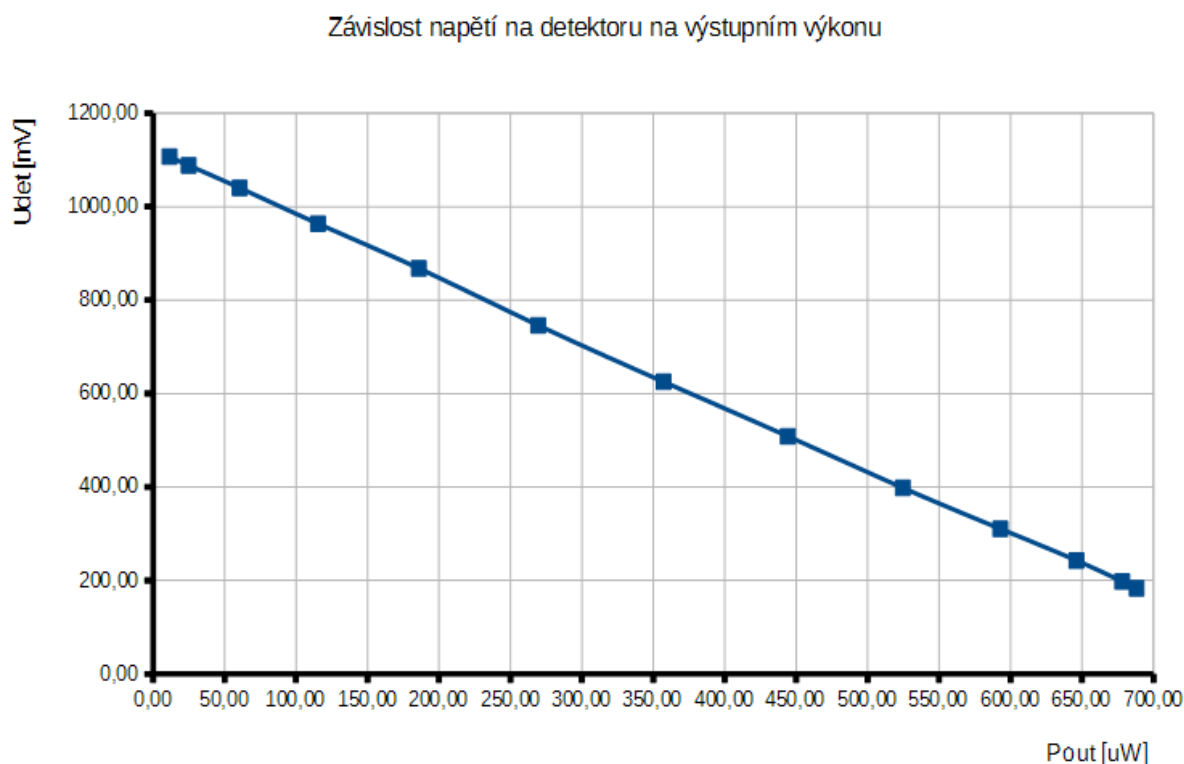
Vidíme, že vložný útlum součástky je cca 4,7 dB, což znamená ztrátu více než poloviny optického výkonu, ale z katalogového listu víme, že tento útlum se má pohybovat typicky kolem 4, maximálně 5 dB. Když započítáme vliv konektorů, tak můžeme s jistotou říci, že modulátor i přes tyto velké hodnoty vyhovuje.

Závislost napětí na detektoru na stejnosměrném napětí DC Bias



Obrázek 6.17: Graf závislosti napětí na detektoru na stejnosměrném napětí DC bias

Na grafu výše vidíme, že průběh napětí na detektoru se mění obdobně jako výstupní výkon  $P_{out}$  na obrázku 6.16 s tím rozdílem, že oba průběhy jsou na sebe inverzní, tedy minimální hodnoty napětí na detektoru jsme dosáhli v hodnotě napětí DC bias = -2,5 V a maximální hodnoty pro napětí DC bias = 3,5 V. To nám také zobrazuje graf na obrázku 6.18, kdy je zřejmé, že změny napětí  $U_{det}$  na detektoru se mění s výstupním optickým výkonem  $P_{out}$  naprosto lineárně.



Obrázek 6.18: Graf závislosti napětí na detektoru na výstupním optickém výkonu

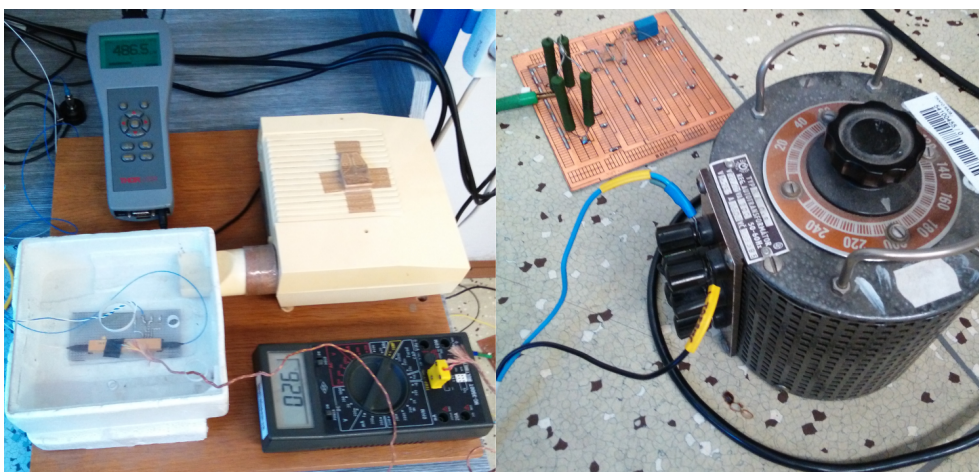
#### 6.2.4 Teplotní závislost

Kromě statických a dynamických charakteristik elektrooptického modulátoru jsme proměřili také i teplotní závislost, tedy jak je zařízení a elektrooptický materiál náchylný na změnu teploty. Výrobce deklaruje, že zařízení je schopné pracovat od 0°C do 70°C. Nás však bude zajímat, zda-li se nějakým způsobem mění vlastnosti modulátoru, popř. jestli nedochází ke změně pracovního bodu.

Měřicí pracoviště je experimentální (obrázek 6.19), kdy modulátor umístíme do izolovaného polystyrenového boxu, do kterého budeme pouštět vzduch o různých teplotách. Tyto teploty budeme regulovat pomocí autotransformátoru, který napájíme ze sítě 230 V. Nastavené teploty budou zobrazeny na měřicím přístroji, které snímáme pomocí termočlánku umístěném přímo na modulátoru. Jelikož je měřicí přístroj s termočlánkem nedokonalý, budou teploty uvnitř polystyrenového boxu pouze orientační.

Měření teplotní závislosti budeme provádět u statických charakteristik pro teploty od 25°C do 70°C pro hodnoty stejnosměrného napětí DC bias od -2,5 V do 3,5 V, protože rozdíl těchto hodnot

charakterizuje hodnotu pólvlnného napětí  $U_{\pi}$ , a tedy pracovní oblast modulátoru. Mezi těmito mezními hodnotami si zvolíme pár bodů, abychom zaplnili celou křivku. Pro každý bod budeme sledovat hodnotu výstupního výkonu  $P_{out}$ . Naměřené hodnoty můžeme vidět v níže uvedené tabulce 6.5, kdy jsme jednotlivé body pro každou teplotu měření proměřovali 12 krát a výsledné hodnoty v tabulce jsou dány již po statistickém zpracování.



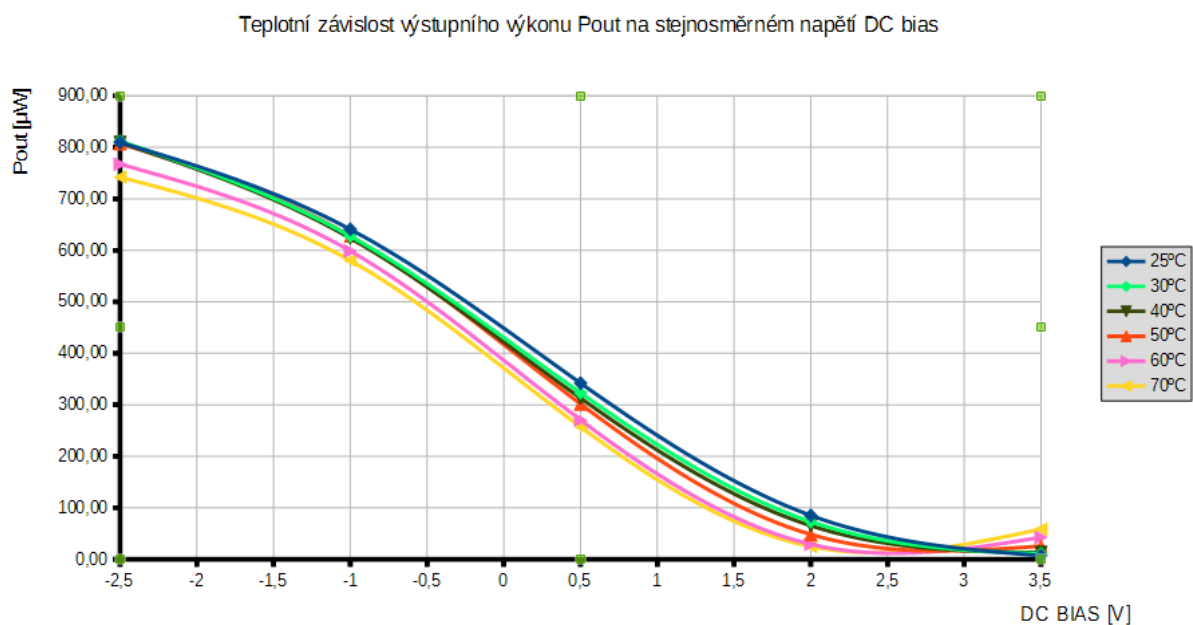
Obrázek 6.19: Měřící pracoviště pro měření teplotní závislosti

Tabulka 6.5: Naměřené hodnoty teplotní závislosti pro pracovní oblast modulátoru

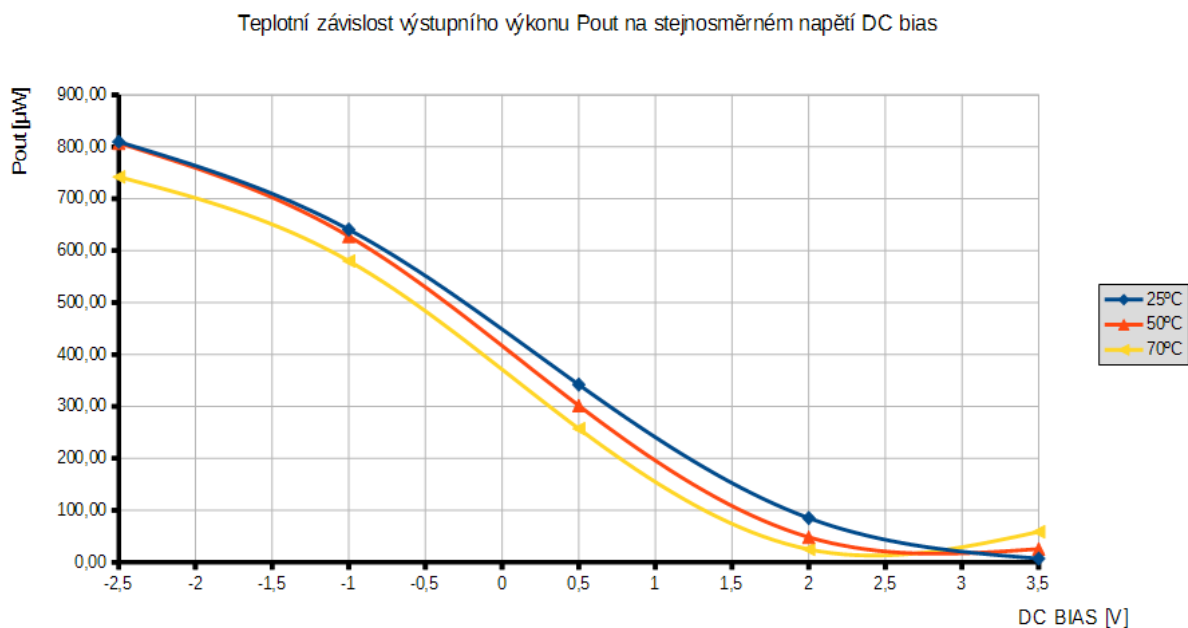
Teplota 25°C		Teplota 30°C		Teplota 40°C	
DC bias [V]	$P_{out}$ [ $\mu$ W]	DC bias [V]	$P_{out}$ [ $\mu$ W]	DC bias [V]	$P_{out}$ [ $\mu$ W]
-2,5	809,76	-2,5	811,96	-2,5	809,43
-1	640,80	-1	627,73	-1	623,63
0,5	342,05	0,5	323,18	0,5	312,96
2	85,01	2	72,99	2	65,27
3,5	7,03	3,5	10,59	3,5	12,84
Teplota 50°C		Teplota 60°C		Teplota 70°C	
DC bias [V]	$P_{out}$ [ $\mu$ W]	DC bias [V]	$P_{out}$ [ $\mu$ W]	DC bias [V]	$P_{out}$ [ $\mu$ W]
-2,5	807,31	-2,5	767,32	-2,5	742,22
-1	627,31	-1	598,51	-1	580,20
0,5	301,63	0,5	270,51	0,5	257,14
2	48,19	2	29,10	2	24,79
3,5	25,51	3,5	42,61	3,5	58,56

Z výše naměřených hodnot je patrné, že pro pracovní teploty do 40°C se modulátor chová více méně podle očekávání. Jeho statická charakteristika se mění jen velmi málo. Od pracovních teplot, které jsou vyšší než 50°C nastává poměrně výrazná změna. U napětí DC bias = -2,5 V, které

charakterizuje vrchol statické křivky, kde výstupní výkon má být nejvyšší, dochází k poklesu tohoto výkonu. Na opačné straně křivky pro DC bias = 3,5 V (minimální výstupní výkon), dochází k výraznému nárůstu výstupního výkonu. Z toho usuzujeme, že pro vysoké pracovní teploty se celá statická křivka posouvá doleva a dochází ke změně nastaveného pracovního bodu. To můžeme vidět na grafu na obrázku 6.20, popř. obrázku 6.21, kde jsou zobrazeny křivky pro mezní pracovní teploty.



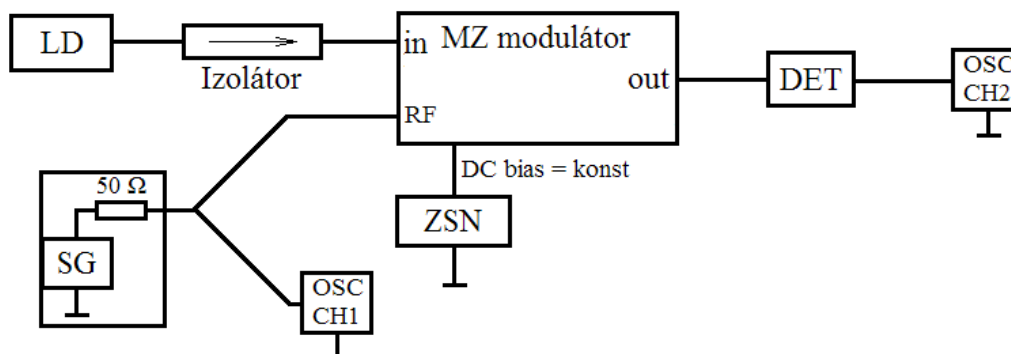
Obrázek 6.20: Teplotní závislost výstupního výkonu  $P_{out}$  na stejnosměrném napětí DC bias



Obrázek 6.21: Teplotní závislost výstupního výkonu  $P_{out}$  na stejnosměrném napětí DC bias (detail)

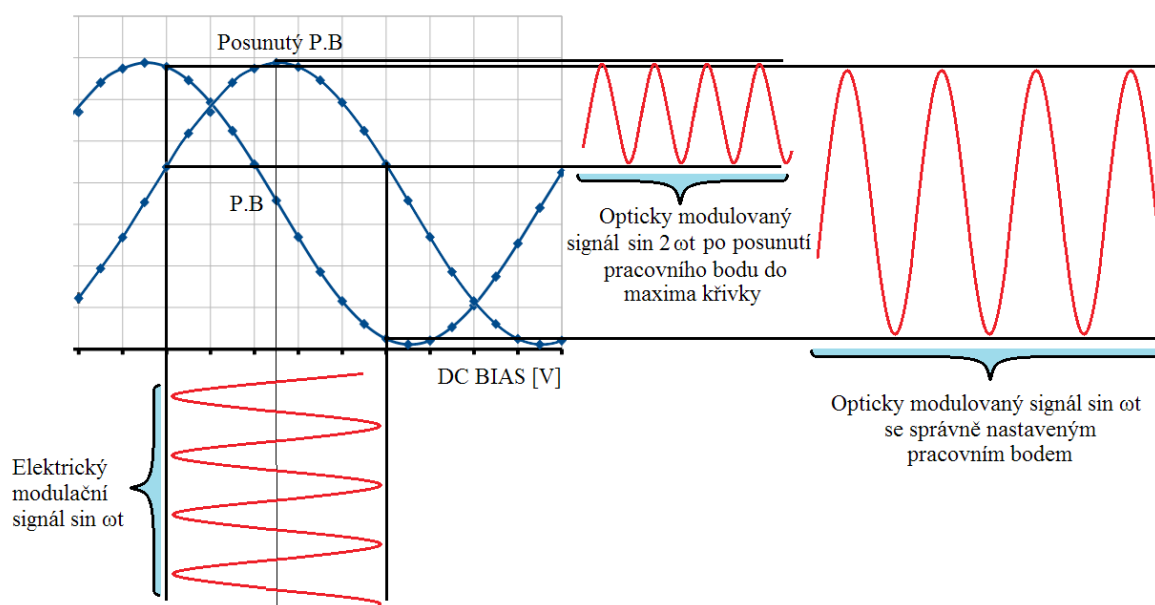
### 6.3 Měření dynamických charakteristik

U měření dynamických charakteristik Mach-Zehnderova modulátoru (obrázek 6.21), tj. závislost výstupního výkonu  $P_{out}$  na frekvencích přicházejících na RF vstup, využíváme znalostí charakteristik statických, které nám vytyčují pracovní oblast.



Obrázek 6.22: Zapojení pro měření dynamických charakteristik

Laserovou diodou vysíláme přes izolátor do modulátoru optický svazek. Na vstupu DC bias nastavíme pracovní napětí, které po celou dobu měření zůstane stejné. Tímto napětím určíme tzv. pracovní oblast modulátoru. Na RF vstup přivádíme z generátoru modulační signál o různých frekvencích a velikosti napětí  $U_{pp} = 5$  V (špička-špička). Tento signál si také zobrazíme na kanálu č.1 osciloskopu. Výstupní (již modulovaný) signál přivádíme na externí detektor, který propojíme s kanálem č.2 osciloskopu.



Obrázek 6.23: Vliv nastavení pracovního bodu modulátoru na vlastnosti modulovaného signálu

Z měření statických charakteristik jsme zjistili, že pracovní oblast modulátoru je při napětí DC Bias od -2,5 do 3,5 V. Pracovní bod jsme si určili podle grafu na obrázku 6.16 na hodnotu 0,5 V, což je střed sestupné části křivky. Pokud bychom zvolili jiný pracovní bod, nastala by situace, kterou vidíme na obrázku výše (obrázek 6.23), kde je vidět, že jakmile se začne pracovní bod pohybovat po křivce, začne se měnit nejen amplituda modulovaného signálu, ale také i frekvence. Proto je v praxi třeba mít neustále pod kontrolou nastavení stejnosměrného napětí DC bias. Protože pokud by docházelo ke změnám podmínek provozu, je třeba ihned reagovat a pracovní bod posunout do správné pozice.

### 6.3.1 Frekvenční závislost

Nyní přikročíme k samotnému měření dynamických charakteristik a testování modulátoru pro různé vstupní signály. Měření bude probíhat pro frekvenční rozsah od 10 kHz do 20 MHz s tím, že nás bude hlavně zajímat chování modulátoru při vyšších kmitočtech. Měření na ještě vyšších frekvencích nebude uskutečněno, neboť nemáme k dispozici rychlejší detektor a generátor nezvládne generovat frekvence vyšší než 20 MHz.

Jak již bylo řečeno, pro detekování optického výkonu použijeme externí detektor Thorlabs DET10C/M (obrázek 6.24), který nám převede optický signál na elektrický, abychom si mohli zobrazit průběhy na osciloskopu.



Obrázek 6.24: Externí detektor Thorlabs DET10C/M

Protože nás zajímá, jaký výkon na detektor dopadá a osciloskop zobrazuje pouze napětí, je třeba si určit převodní konstantu  $K$  mezi dopadajícím výkonem na detektor a odpovídajícím generovanému napětí přiváděné na osciloskop. Konstantu jsme určili experimentálně, tzn. že bez puštěného generátoru vysíláme optický signál o známém výkonu na detektor. Na osciloskopu se nám objeví konstantní stejnosměrná složka napětí, která je úměrná dopadajícímu výkonu. Postup výpočtu je uveden níže.

$$\text{Dopadající výkon } P_{out} = 786 \mu W \rightarrow \text{odpovídající generované napětí } U_{det} = 42 mV$$

$$\text{Pro odpovídající napětí } U_{det} = 1 mV \rightarrow \text{dopadající výkon } P_{out} = x \mu W$$

$$x[\mu W] = \frac{786 \mu W \cdot 1 mV}{42 mV} = 18,71 \mu W \quad (6.4)$$

$$K \left[ \frac{\mu W}{mV} \right] = \frac{18,71 \mu W}{1 mV} = 18,71 \frac{\mu W}{mV} \quad (6.5)$$

Měření dynamické charakteristiky bude probíhat pro konstantní hodnoty stejnosměrného napětí DC bias. Pro změření frekvenční závislosti si určíme velikosti napětí tak, abychom na výstupu dostali co největší rozkmit a v opačném případě co nejmenší rozkmit. Největšího rozkmitu jsme dosáhli při napětí DC bias na hodnotě 0,5 V a nejmenšího rozkmitu na hodnotě -2,7 V pro pracovní bod na vrcholu statické křivky, resp. 2,9 V pro pracovní bod v minimálním bodě statické křivky. Naměřené hodnoty napětí, resp. přepočítaných výkonů podle konstanty vidíme v tabulce 6.6.

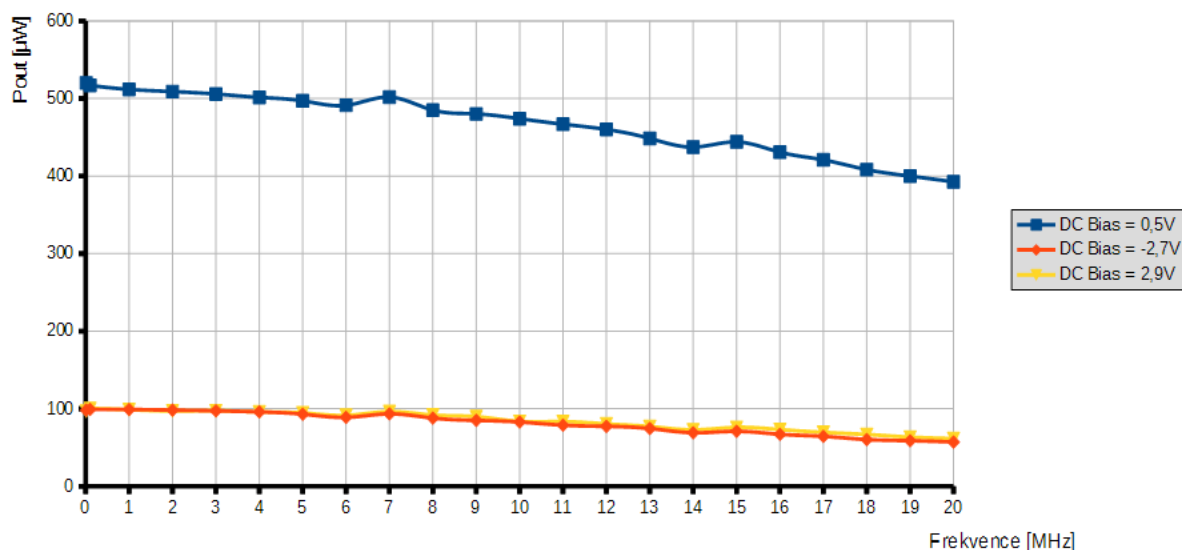
*Tabulka 6.6: Naměřené hodnoty závislosti detekovaného napětí, resp. výkonu na frekvenci*

Frekvence [MHz]	DC bias = -2,7 V		DC bias = 0,5 V		DC bias = 2,9 V	
	Upp [mV]	Pout [ $\mu$ W]	Upp [mV]	Pout [ $\mu$ W]	Upp [mV]	Pout [ $\mu$ W]
0,01	5,25	98,23	27,81	520,33	5,18	96,92
0,1	5,30	99,16	27,64	517,14	5,35	100,10
1	5,29	98,98	27,36	511,91	5,28	98,79
2	5,25	98,23	27,21	509,10	5,19	97,10
3	5,20	94,29	27,04	505,92	5,21	97,48
4	5,13	95,98	26,81	501,62	5,13	95,98
5	4,97	92,99	26,57	497,12	5,06	94,67
6	4,75	88,87	26,26	491,32	4,89	91,49
7	4,99	93,36	26,83	501,99	5,15	96,36
8	4,70	87,94	25,93	485,15	4,91	91,87
9	4,54	84,94	25,67	480,29	4,80	89,81
10	4,43	82,89	25,34	474,11	4,47	83,63
11	4,21	78,77	24,96	467,00	4,46	83,45
12	4,13	77,27	24,60	460,27	4,30	80,45
13	3,98	74,47	23,98	448,67	4,12	77,09
14	3,69	69,04	23,38	437,44	3,89	72,78
15	3,79	70,91	23,74	444,18	4,06	75,96
16	3,58	66,98	23,03	430,89	3,91	73,16
17	3,44	64,36	22,50	420,98	3,72	69,60
18	3,22	60,25	21,83	408,44	3,57	66,79
19	3,14	58,75	21,38	400,02	3,39	63,43
20	3,05	57,07	20,99	392,72	3,29	61,56

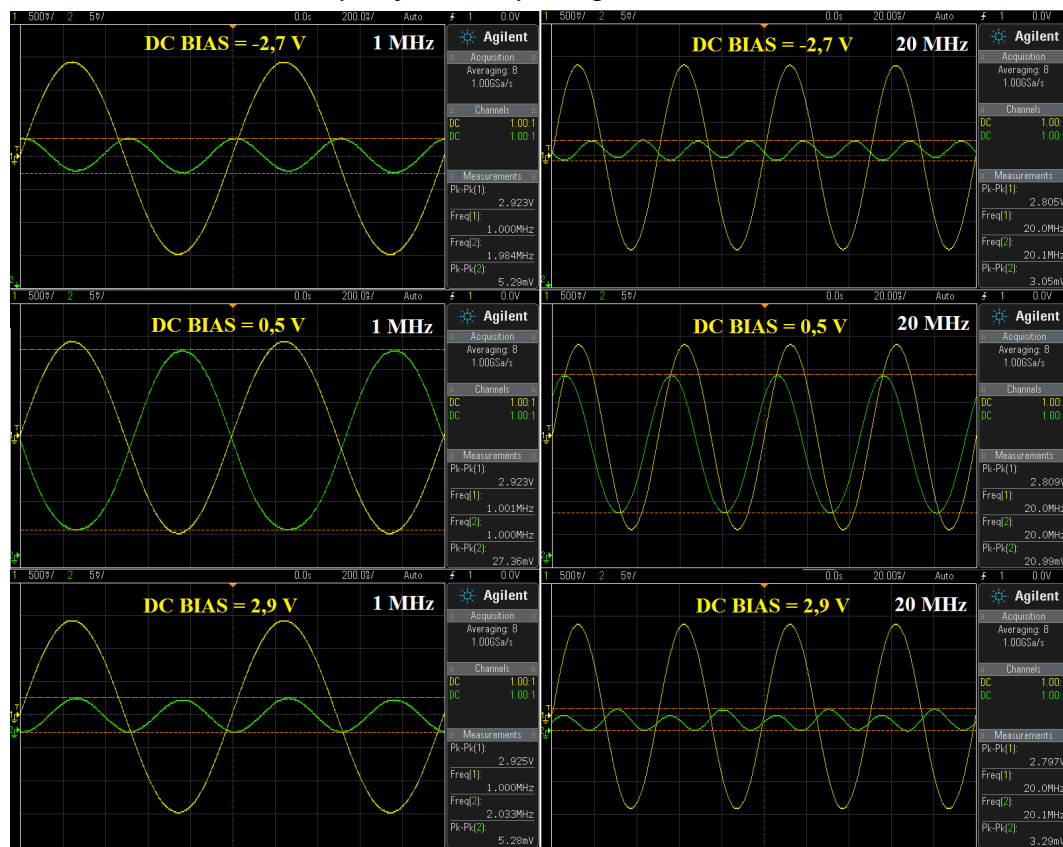


Z výše uvedené tabulky a její hodnot můžeme s jistotou říci, že se zvyšující se frekvencí při zachování konstantní hodnoty pracovního bodu (napětí DC bias) nám rozkmit výstupního napětí  $U_{pp}$ , resp. výstupního výkonu  $P_{out}$  klesá. Tento trend potvrzuje i graf na níže uvedeném obrázku 6.25.

Závislost výstupního výkonu  $P_{out}$  na frekvenci pro různě nastavené pracovní body



Obrázek 6.25: Závislost výstupního výkonu  $P_{out}$  na frekvenci pro různě nastavené pracovní body stejnsměrným napětím DC bias



Obrázek 6.26: Porovnání průběhů modulačního (žlutý) a modulovaného (zelený) signálu při frekvenci 1 MHz a 20 MHz pro různě nastavené pracovní body

Když se zaměříme na výstupní grafy z osciloskopu a průběhy modulačního a modulovaného signálu (obrázek 6.26), můžeme vidět, že amplituda výstupního modulovaného signálu se snižuje s rostoucí frekvencí. Dále si všimněme rozkmitu, který je při ideálním nastavení pracovního bodu nejvyšší. Další typickou charakteristickou vlastností je, že pokud pracovní bod není ideálně nastaven, dochází nejen ke změně amplitudy, ale také i frekvence, což jsme si teoreticky ukázali na obrázku 6.23. Co stojí dále za zmínku, je to, že při vyšších kmitočtech dochází k fázovému zpoždění modulovaného signálu od modulačního, což při kmitočtu 1 MHz neplatí a při této frekvenci jsou průběhy v protifázi.

### 6.3.2 Závislost nastaveného pracovního bodu na tvar modulovaného signálu

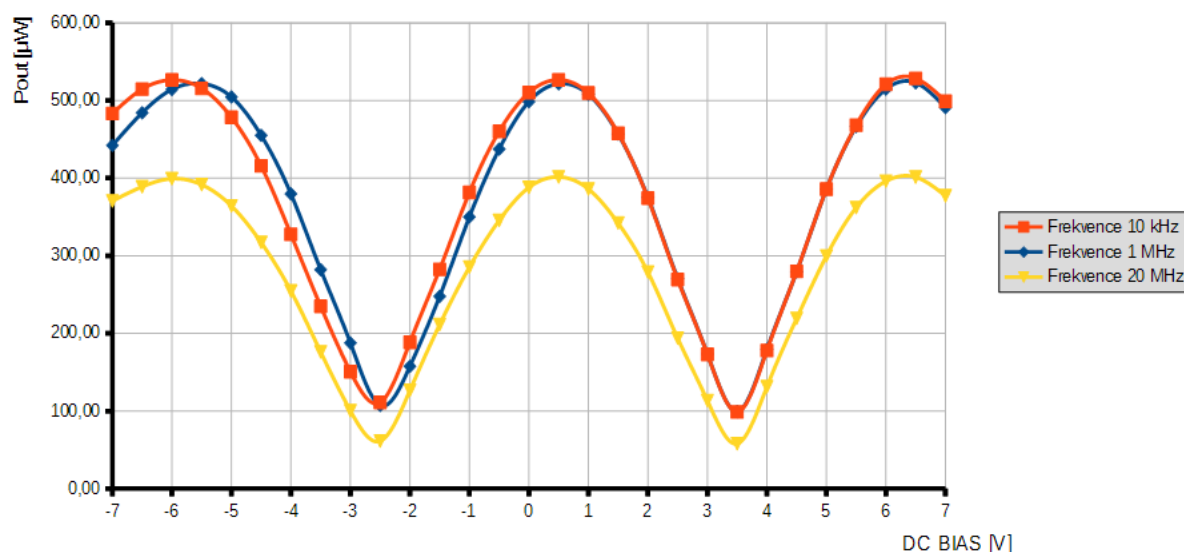
Další částí měření dynamických charakteristik bylo ověřit si chování a závislost modulovaného signálu na nastaveném pracovním bodu (napětí DC bias). Měření probíhalo na třech frekvencích (10 kHz, 1 MHz a 20 MHz), které zůstávaly neměnné po celou dobu měření. Na níže uvedené tabulce 6.7 a obrázku 6.27 můžeme vidět porovnání rozkmitu výstupního signálu na stejnosměrném napětí DC bias pro různé kmitočty.

*Tabulka 6.7: Naměřené hodnoty závislosti detekovaného napětí, resp. výkonu na nastaveném pracovním bodu DC bias pro konstantní kmitočet*

DC bias [V]	Frekvence 10 kHz		Frekvence 1 MHz		Frekvence 20 MHz	
	U <sub>pp</sub> [mV]	P <sub>out</sub> [μW]	U <sub>pp</sub> [mV]	P <sub>out</sub> [μW]	U <sub>pp</sub> [mV]	P <sub>out</sub> [μW]
-7	25,83	483,28	23,64	442,30	19,81	370,65
-6,5	27,51	514,71	25,88	484,21	20,79	388,98
-6	28,14	526,50	27,49	514,34	21,34	399,27
-5,5	27,56	515,65	27,89	521,82	20,93	391,60
-5	25,57	478,41	26,97	504,61	19,47	364,28
-4,5	22,22	415,74	24,33	455,21	16,95	317,13
-4	17,51	327,61	20,30	379,81	13,61	254,64
-3,5	12,56	235,00	15,08	282,15	9,41	176,06
-3	8,05	150,62	10,03	187,66	5,36	100,29
-2,5	5,93	110,95	5,73	107,21	3,27	61,18
-2	10,08	188,60	8,42	157,54	6,76	126,48
-1,5	15,10	282,52	13,24	247,72	11,29	211,24
-1	20,40	381,68	18,71	350,06	15,26	285,51
-0,5	24,60	460,27	23,38	437,44	18,47	345,57
0	27,27	510,22	26,65	498,62	20,74	388,05
0,5	28,15	526,69	27,88	521,63	21,46	401,52
1	27,24	509,66	27,15	507,98	20,63	385,99

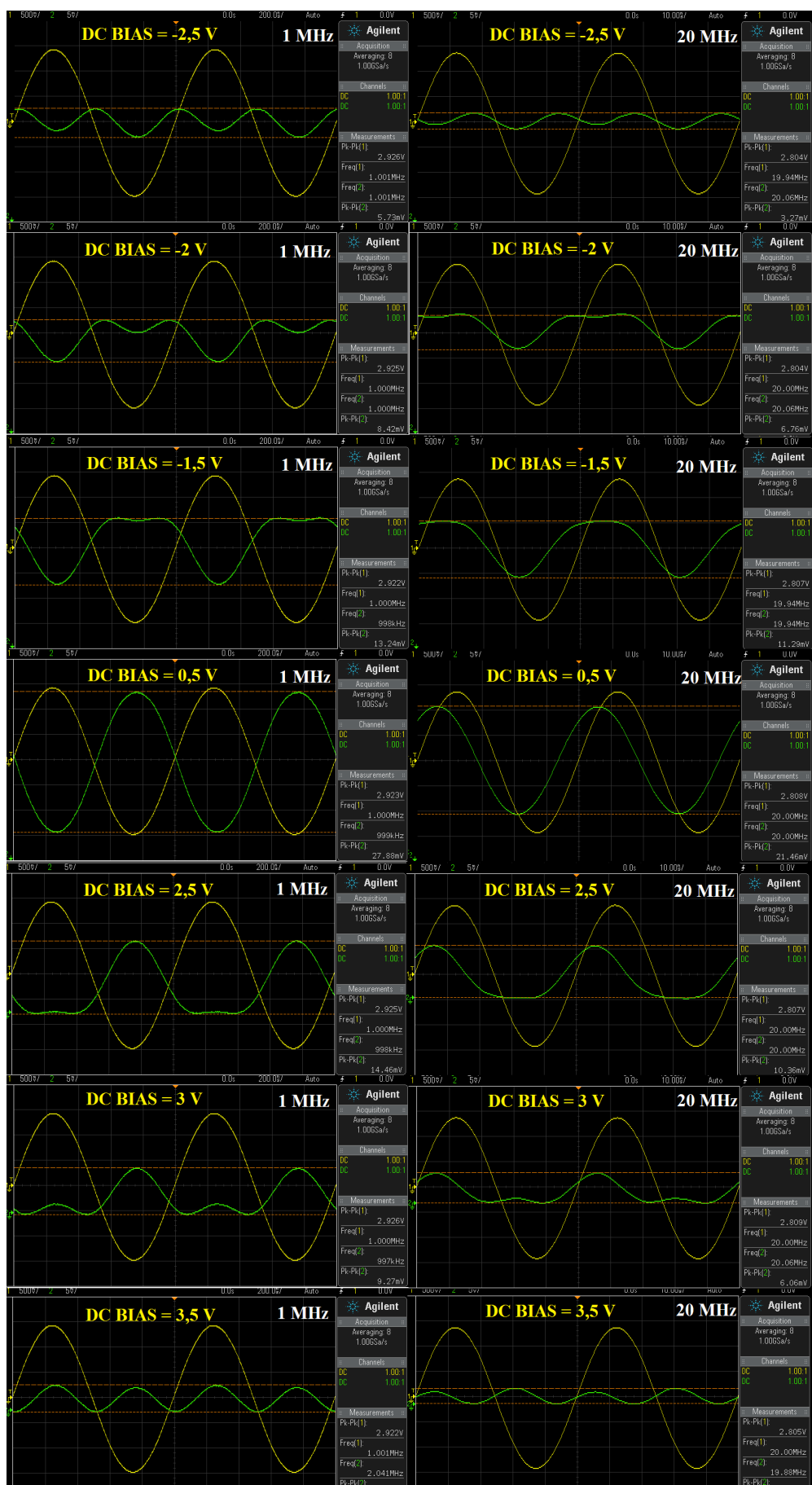
DC bias [V]	Frekvence 10 kHz		Frekvence 1 MHz		Frekvence 20 MHz	
	Upp [mV]	Pout [ $\mu$ W]	Upp [mV]	Pout [ $\mu$ W]	Upp [mV]	Pout [ $\mu$ W]
1,5	24,47	457,83	24,42	456,90	18,28	342,02
2	20,00	374,20	20,05	375,14	14,91	278,97
2,5	14,40	269,42	14,46	270,55	10,36	193,84
3	9,25	173,07	9,27	173,44	6,06	113,38
3,5	5,28	98,79	5,31	99,35	3,09	57,81
4	9,51	177,93	9,59	179,43	7,01	131,16
4,5	14,96	279,90	14,94	279,53	11,72	219,28
5	20,62	385,80	20,62	385,80	16,02	299,73
5,5	25,03	468,31	24,94	466,63	19,35	362,04
6	27,84	520,89	27,51	514,71	21,17	396,09
6,5	28,25	528,56	27,95	522,94	21,45	401,33
7	26,68	499,18	26,24	490,95	20,16	377,19

Závislost výstupního výkonu Pout na nastaveném pracovním bodu pro konstantní frekvence



Obrázek 6.27: Závislost výstupního výkonu Pout na nastaveném stejnosměrném pracovním bodu DC bias při konstantní frekvenci

Z grafu vidíme, že co se týká nižších frekvencí, tak průběhy a změny výstupního výkonu, resp. napětí jsou velmi podobné. Při vyšších kmitočtech tomu tak není. Dosáhli jsme maximálního rozkmitu kolem 400  $\mu$ W a potvrdili jsme tak měření dle tabulky 6.6, kde jsme měřili frekvenční závislost při ideálně a neideálně nastaveném pracovním bodu a zjistili jsme že s rostoucí frekvencí rozkmit klesá. Co se týká tvaru výstupního modulovaného signálu, tak ty můžeme vidět na obrázku 6.28. Na ukázkou jsou použity pouze kmitočty 1 MHz a 20 MHz, protože jak již víme, při nižších kmitočtech jsou průběhy velmi podobné. Jako napětí jsme zvolili pracovní oblast, tj. -2,5V – 3,5V.



Obrázek 6.28: Porovnání průběhů modulačního (žlutý) a modulovaného (zelený) signálu při frekvenci 1 MHz a 20 MHz pro pracovní oblast modulatoru

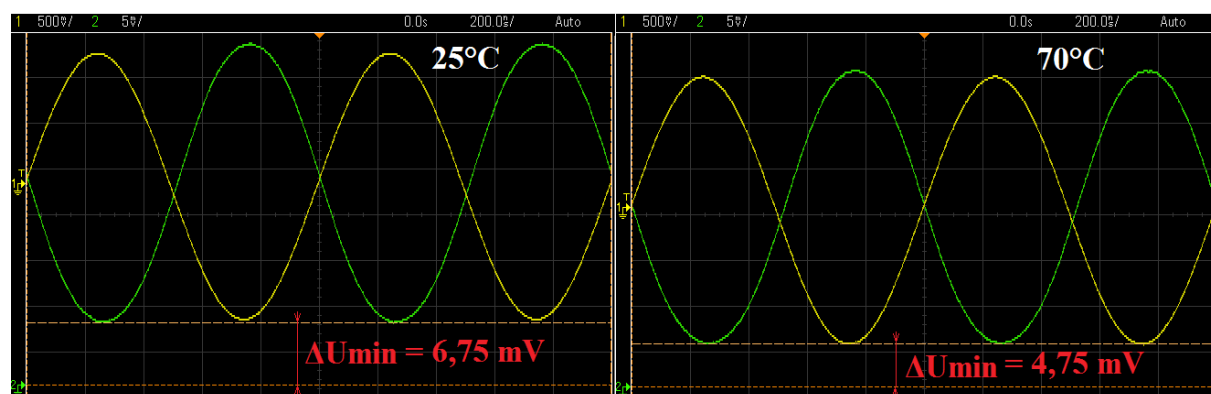
Na výše uvedeném obrázku jsou vyznačeny průběhy v pracovní oblasti modulátoru, při kterých docházelo k nejvýraznějším změnám výstupního signálu. Všechny ostatní naměřené průběhy (také pro kmitočet 10 kHz) jsou uloženy v externím souboru (viz. pozn. u obsahu příloh).

### 6.3.3 Teplotní závislost

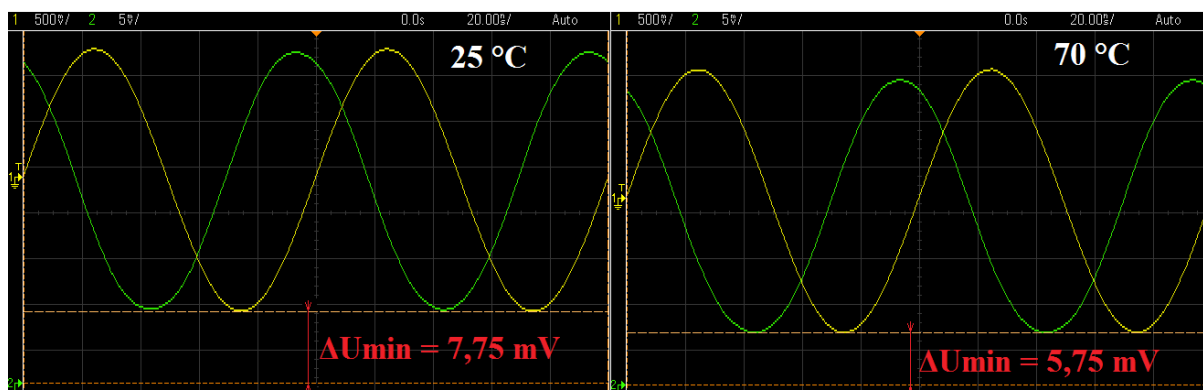
Posledním bodem měření je stejně jako u statických charakteristik měření teplotní závislosti. Už víme, jakým způsobem teplota ovlivňuje průběhy a celkové nastavení pracovního bodu. Dále víme, že pokud chceme modulátor provozovat při vysokých teplotách, musíme pracovní bod (napětí DC bias) posunout o cca 0,5 V. U měření teplotní závislosti pro dynamickou funkci modulátoru budeme zkoumat, o kolik a jak se posune stejnosměrná složka výstupního modulovaného signálu. Jinými slovy, jak moc je nejnižší úroveň výstupního signálu vzdálena od nulového potenciálu. V ideálním případě bychom při modulacích chtěli, aby signál s úrovní log 0 měl nulovou hodnotu, tedy že by se nepřenašel žádný optický výkon. V praxi tomu tak není a při hodnotě log 0 bude na výstupu vždycky nějaká úroveň signálu. Naměřené hodnoty rozdílu nejnižší úrovně signálu od nulového potenciálu můžeme vidět v níže uvedené tabulce 6.8 a pro porovnání průběhy pro teploty 25 a 70°C na obrázcích 6.29, 6.30 a 6.31. Všechny ostatní průběhy můžeme najít opět v externím souboru.

Tabulka 6.8: Naměřené hodnoty rozdílu nejnižší úrovně signálu od nulového potenciálu

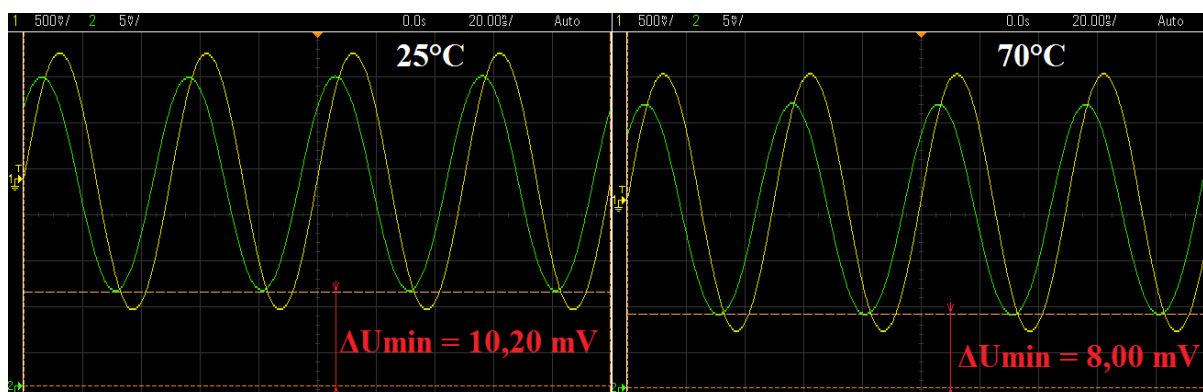
Teplota [°C]	Frekvence 1 MHz		Frekvence 10 MHz		Frekvence 20 MHz	
	$\Delta U_{\min}$ [mV]	$\Delta P_{\min}$ [ $\mu$ W]	$\Delta U_{\min}$ [mV]	$\Delta P_{\min}$ [ $\mu$ W]	$\Delta U_{\min}$ [mV]	$\Delta P_{\min}$ [ $\mu$ W]
25	6,75	126,29	7,75	145,00	10,20	190,84
30	5,20	97,29	6,33	118,34	9,33	174,47
40	3,88	72,50	6,08	113,66	8,58	160,44
50	5,13	95,89	6,45	120,68	8,75	163,71
60	5,13	95,89	6,13	114,60	8,250	154,36
70	4,75	88,87	5,75	107,58	8,000	149,70



Obrázek 6.29: Naměřené hodnoty rozdílu nejnižší úrovně signálu od nulového potenciálu pro frekvenci 1 MHz a teploty 25°C a 70°C



Obrázek 6.30: Naměřené hodnoty rozdílu nejnižší úrovně signálu od nulového potenciálu pro frekvenci 10 MHz a teploty 25°C a 70°C



Obrázek 6.31: Naměřené hodnoty rozdílu nejnižší úrovně signálu od nulového potenciálu pro frekvenci 20 MHz a teploty 25°C a 70°C

## 7 Závěr

Cílem diplomové práce bylo navrhnout měřicí pracoviště pro odměření statických a dynamických charakteristik intenzitního (Mach-Zehnderova) elektrooptického modulátoru. Statickými charakteristikami se myslela závislost výstupního optického výkonu na elektrickém poli (elektrickém napětí) přivedeném na modulátor, které způsobuje změnu indexu lomu elektrooptického anizotropního materiálu. Změna indexu lomu způsobovala fázové zpoždění (posun) optického svazku v jedné větvi modulátoru, a díky principu skládání vln docházelo při sloučení obou větví buď ke konstruktivnímu nebo destruktivnímu skládání, a tím pádem změně výstupního výkonu. Dynamickými charakteristikami se myslela závislost rozkmitu výstupního modulovaného signálu na modulačním, které jsme na modulátor přiváděli z generátoru signálů.

Před odměřením statických charakteristik byl navržen elektronický obvod pro regulaci stejnosměrného napětí DC bias, a také snímací obvod pro integrovaný fotodetektor. Jako vstupní zdroj světla jsem použil vysoce jakostní DFB laserovou diodu o vlnové délce 1550 nm a výstupním výkonu 2 mW. Při měření jsem dále dbal na správné nastavení požadovaného napětí DC bias a zjistil jsem, že výstupní výkon modulátoru se mění téměř podle sinusového průběhu, kde rozdíl mezi nejvyšší úrovní a nejnižší, tzv. půlvlnné napětí bylo cca 5 V. Pracovní bod modulátoru jsem určil ze statické křivky na hodnotu kolem 0,5 V. Zajímavé bylo, že napětí na integrovaném detektoru s rostoucím výkonem klesalo, což by mělo být právě naopak a je možné, že výrobce modulátoru přidal nějaké doplňující obvody do součástky, které nebyly uvedeny v datasheetu. Dále jsem proměřil teplotní závislost a bylo zjištěno, že modulátor je schopen pracovat až do teplot 70°C jak uvádí výrobce s tím, že při vysokých teplotách (> 50°C) dochází k posuvu celé statické charakteristiky o cca 0,5 V směrem doleva.

Při měření dynamických charakteristik jsem jako zdroj modulačního signálu použil signál sinusový. Původně se uvažovalo o signálu s obdélníkovým průběhem, ale od toho se upustilo z toho důvodu, že generátor při vysokých kmitočtech nedokáže věrohodně generovat požadovaný tvar. Další limitací byl externí detektor, který byl schopen detekovat frekvence do 20 MHz. Možná by zvládl i více, ale je možné že by už mohlo docházet ke zkreslení. Měřením samotným jsem zjistil, že je nutné mít velmi dobře nastavený pracovní bod, abychom na výstupu dosáhli co největšího rozkmitu. Ten ale bohužel se zvyšující se frekvencí klesá. Dalším zjištěním bylo, že při vysokých kmitočtech dochází také k fázovému zpoždění výstupního signálu a při špatně nastaveném pracovním bodu, kromě poklesu rozkmitu, také k deformaci modulovaného signálu. I u dynamického měření jsem proměřil teplotní závislost, konkrétně jak teplota ovlivňuje rozkmit výstupního signálu a jaký je rozdíl napětí (resp. výkonu) v nejnižším bodě od nulového potenciálu. Zjistil jsem, že při vysílání logické 0, kdy by se ideálně neměl přenášet žádný výkon, se vysílá výkon o určité, i když malé, velikosti. Ten nicméně s rostoucí teplotou klesá.

Myslím si, že elektrooptický intenzitní modulátor, nebo externí elektrooptické modulátory obecně, jsou rozhodně cesta vpřed, co se týká trendu zvyšování přenosových rychlostí a kapacit, kdy při dosažení takovýchto rychlostí je třeba využití externí modulace. Nevýhodou se může jevit poměrně vysoký vložný útlum, kterou tyto komponenty mají a nutnost složitějšího řízení a ovládání (hlavně při udržování ideálního pracovního bodu). Nicméně věřím, že postupem času, jak roste trend zdokonalování technologií, se všechny nedostatky vychytají a dokážou eliminovat.

Závěrem bych chtěl hlavně vyzdvihnout, že tato práce byla velmi zajímavá, hodně mě bavila a byla pro mě obrovským přínosem. Optoelektronika a optické komunikace jsou rozhodně odvětví budoucnosti a doufám, že budu mít možnost se tomuto oboru i nadále věnovat ve svém kariérním životě.



## 8 Seznam použité literatury

- [1] JANDORA, Radek. Vlnění. [online]. 2000 [cit. 2015-01-27]. Dostupné z: <http://radek.jandora.sweb.cz/f11.htm>
- [2] Interference vlnění. In: AL], Jan Kopečný ... [et]. Fyzika pro bakaláře [online]. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2006 [cit. 2015-01-27]. ISBN 8024812002. Dostupné z: [http://www.studopory.vsb.cz/studijnimaterialy/Fyzikaprobakalare/PDF/1\\_8\\_2\\_interf.pdf](http://www.studopory.vsb.cz/studijnimaterialy/Fyzikaprobakalare/PDF/1_8_2_interf.pdf)
- [3] TKÁČ, Petr. Mach-Zehnderův interferometr jako modulátor pro optické komunikace [online]. Ostrava, 2011 [cit. 2015-04-04]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/87162>. Diplomová práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce prof. RNDr. VLADIMÍR VAŠÍNEK, CSc.
- [4] PAVELEK, Milan, Eva JANOTKOVÁ a Josef ŠTĚTINA. Koherence záření. PAVELEK EN [online]. Brno, 2006 [cit. 2015-04-04]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/0206.htm>
- [5] INTERFERENCE SVĚTLA. Gymnázium Ladislava Jaroše Holešov [online]. [cit. 2015-04-04]. Dostupné z: [http://www.gymhol.cz/projekt/fyzika/08\\_interf/08\\_interf.htm](http://www.gymhol.cz/projekt/fyzika/08_interf/08_interf.htm)
- [6] ŠÍŠKA, Petr. A KOLEKTIV. Nekomunikační Aplikace Optických Vlákien. Ostrava, [cit. 2015-04-04] Skriptum. VŠB – Technická univerzita Ostrava. 95 s.
- [7] RÝC, Jan. MICHELSONŮV INTERFEROMETR. Brno, 2011. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=38584](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=38584). Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. ZDENĚK HAVRÁNEK, Ph.D.
- [8] LÓPEZ-HIGUERA, José Miguel. Handbook of optical fibre sensing technology. New York: Wiley, 2002, xxix, 795 p. ISBN 04-718-2053-9.
- [9] FEJT, Radek. Optický vláknový gyroskop. Senzory | Úvodem [online]. 2012 [cit. 2015-04-04]. Dostupné z: <http://senzory.aspone.cz/ovg.htm>
- [10] STACH, Vojtěch. Fabry–Perotův interferometr. EAMOS - výukový systém [online]. 2002-2015 [cit. 2015-04-04]. Dostupné z: [http://eamos.pf.jcu.cz/amos/kat\\_fyz/externi/kat\\_fyz\\_7769/II/fp\\_i/fabry\\_perot.pdf](http://eamos.pf.jcu.cz/amos/kat_fyz/externi/kat_fyz_7769/II/fp_i/fabry_perot.pdf)
- [11] MAŤÁTKO, Jan. Elektronika. 6. vyd., V Idea servis 4. vyd. Praha: Idea servis, 2005, 327 s. ISBN 80-859-7049-X.
- [12] LUKÁŠ, Michal. Laserové diody: část 1. Základní principy. Odborné časopisy [online]. Trutnov, 2014 [cit. 2015-04-04]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/laserove-diody-cast-1-zakladni-principy--16331>
- [13] KOUDELKA, Petr. Optické komunikace III: Tutoriál č. 2 [prezentace]. Ostrava, [cit. 2015-04-04] VŠB – Technická univerzita Ostrava 2014, 71 s., 24.10.2014.
- [14] URBAN, František a Břetislav MIKEL. OPTOELEKTRONIKA. Brno, 2012. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/oks/cz/pdf/skripta.pdf>. Skriptum. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.

- [15] MIEKISCH, Jiří. Přenos a zpracování informací. Střední škola průmyslová a umělecká Opava [online]. Opava, 2011/2012 [cit. 2015-04-04]. Dostupné z: [http://www.strojka.opava.cz/UserFiles/File/\\_sablon/AUT\\_IV/VY\\_32\\_INOVACE\\_E-15-03.pdf](http://www.strojka.opava.cz/UserFiles/File/_sablon/AUT_IV/VY_32_INOVACE_E-15-03.pdf)
- [16] VITÁSEK, Jan. Optické atmosférické komunikace. Ostrava, 2014. Skriptum. VŠB – Technická univerzita Ostrava.
- [17] HUNSPERGER, Robert G. Integrated optics: theory and technology. 6th ed. London: Springer, c2009, xxviii, 513 p. ISBN 03-878-9774-7.
- [18] BASS, Michael. Handbook of optics. 2nd ed. / . New York: McGraw-Hill, c1995-c2001, 4 v. ISBN 00713645604. Dostupné z: <http://iate.oac.uncor.edu/~manuel/libros/Optics/Handbook%20of%20Optics%20%20second%20edition%20vol.%202%20-%20Bass%20M.pdf>
- [19] JEŘÁBEK, Vítězslav. Součástky a systémy pro distribuci a ovládání optického svazku: Elektro-optický jev [prezentace]. Dostupné z: <http://www.micro.feld.cvut.cz/home/X34NFS/prednasky/Elektrooptick%EC%20jev.ppt>, Praha, [cit. 2015-04-04] FEL ČVUT v Praze 2009, 17 s.
- [20] HOBBS, Philip C. Building Electro-optical Systems: Making it all Work. New York: John Wiley, 2000, 727 s. ISBN 04-712-4681-6.
- [21] PASCHOTTA, Rüdiger. Nonlinear Crystal Materials. RP Photonics Encyclopedia [online]. 2007 [cit. 2015-04-04]. Dostupné z: [http://www.rp-photonics.com/nonlinear\\_crystal\\_materials.html](http://www.rp-photonics.com/nonlinear_crystal_materials.html)
- [22] SALEH, Bahaa E. Fundamentals of photonics. New York: John Wiley, 1991, xviii, 966 s. ISBN 04-718-3965-5

## 9 Seznam obrázků

Obrázek 2.1: Skládání vln: a) ve fázi, b) v protifázi.....	3
Obrázek 2.2: Optické záření: a) koherentní, b) nekoherentní.....	4
Obrázek 2.3: Časová koherence.....	4
Obrázek 2.4: Prostorová koherence.....	5
Obrázek 2.5: Interference optického záření (Youngův experiment).....	6
Obrázek 3.1: Michelsonův interferometr.....	8
Obrázek 3.2: Michelsonův optický interferometr.....	9
Obrázek 3.3: Mach-Zehnderův interferometr.....	10
Obrázek 3.4: Mach-Zehnderův optický interferometr.....	11
Obrázek 3.5: Sagnacův interferometr.....	12
Obrázek 3.6: Fabry-Perotův interferometr.....	13
Obrázek 3.7: Průběh Airyho funkce pro různé činitele jemnosti F.....	14
Obrázek 4.1: Absorpce fotonu v polovodiči.....	16
Obrázek 4.2: Emise záření: a) samovolná, b) stimulovaná.....	16
Obrázek 4.3: Inverze populace.....	17
Obrázek 4.4: Fabry-Perotův rezonátor.....	17
Obrázek 4.5: Souvislost mezi vidy a rozměry optického rezonátoru.....	18
Obrázek 4.6: Konstrukce fotodiody PIN.....	20
Obrázek 4.7: Konstrukce lavinové fotodiody APD.....	21
Obrázek 4.8: Závislost multiplikačního faktoru na elektrickém poli.....	22
Obrázek 5.1: Základní princip modulátoru.....	23
Obrázek 5.2: Základní rozdělení optických modulátorů.....	23
Obrázek 5.3: Optická modulace: a) interní, b) externí.....	24
Obrázek 5.4: Optický krystal: a) izotropní, b) anizotropní.....	26
Obrázek 5.5: Šíření vln v lithium niobátu (LiNbO <sub>3</sub> ).....	28
Obrázek 5.6: Závislost indexu lomu na elektrickém poli E: a) Pockelsův článek, b) Kerrův článek.....	31
Obrázek 5.7: Princip elektrooptického modulátoru.....	32
Obrázek 5.8: Elektrooptický modulátor: a) podélný, b) příčný.....	32
Obrázek 5.9: Fázový modulátor s polarizovaným světlem podle osy x při použitím modulačním napětí.....	33
Obrázek 5.10: Závislost fázového posunu na elektrickém napětí.....	34
Obrázek 5.11: Rozdíl mezi: a) příčným modulátorem a b) příčným modulátorem s postupnou vlnou.....	35
Obrázek 5.12: Opticky integrovaný fázový modulátor.....	36
Obrázek 5.13: Polarizační modulátor při použitím modulačním napětí.....	36
Obrázek 5.14: Závislost fázového zpoždění na elektrickém napětí.....	37
Obrázek 5.15: Vývoj polarizačních stavů modulátoru pro různá fázová zpoždění lineárně polarizovaných vln.....	38
Obrázek 5.16: Intenzitní modulátor s použitím dynamického retardéru a křížových polarizátorů.....	38
Obrázek 5.17: Optický intenzitní modulátor (Mach-Zehnderův).....	40
Obrázek 6.1: Popis intenzitního Mach-Zehnderova modulátoru.....	41
Obrázek 6.2: DFB laserová dioda.....	43
Obrázek 6.3: Teplotní kontrolér Thorlabs TED200C a kontrolér laserové diody Thorlabs LDC205C.....	43
Obrázek 6.4: Izolátor.....	44
Obrázek 6.5: Zdroj stejnosměrného napětí Diametral.....	45
Obrázek 6.6: Optický měřič výkonu Thorlabs.....	45
Obrázek 6.7: Digitální dvoukanálový osciloskop Agilent DSO-X 2012A.....	46
Obrázek 6.8: Zapojení pro měření statických charakteristik.....	46
Obrázek 6.9: Obvod pro plynulou regulaci stejnosměrného napětí DC bias.....	47
Obrázek 6.10: Nastavení výstupního napětí obvodu TL431.....	48
Obrázek 6.11: Řízení pro nastavení stejnosměrného napětí DC bias.....	49

Obrázek 6.12: Obvod pro stabilizaci napětí pro integrovaný fotodetektor.....	49
Obrázek 6.13: Regulace napětí stabilizátoru LM317.....	50
Obrázek 6.14: Obvod pro snímání napětí z integrovaného fotodetektoru.....	50
Obrázek 6.15: Stabilizátor napětí a snímací obvod fotodetektoru v kovovém pouzdře.....	51
Obrázek 6.16: Graf závislosti výstupního výkonu Pout na stejnosměrném napětí DC Bias.....	52
Obrázek 6.17: Graf závislosti napětí na detektoru na stejnosměrném napětí DC Bias.....	53
Obrázek 6.18: Graf závislosti napětí na detektoru na výstupním optickém výkonu.....	54
Obrázek 6.19: Měřicí pracoviště pro měření teplotní závislosti.....	55
Obrázek 6.20: Teplotní závislost výstupního výkonu Pout na stejnosměrném napětí DC bias.....	56
Obrázek 6.21: Teplotní závislost výstupního výkonu Pout na stejnosměrném napětí DC bias (detail). ..	56
Obrázek 6.22: Zapojení pro měření dynamických charakteristik.....	57
Obrázek 6.23: Vliv nastavení pracovního bodu modulátoru na vlastnosti modulovaného signálu.....	57
Obrázek 6.24: Externí detektor Thorlabs DET10C/M.....	58
Obrázek 6.25: Závislost výstupního výkonu Pout na frekvenci pro různě nastavené pracovní body stejnosměrným napětím DC bias.....	60
Obrázek 6.26: Porovnání průběhů modulačního (žlutý) a modulovaného (zelený) signálu při frekvenci 1 MHz a 20 MHz pro různě nastavené pracovní body.....	60
Obrázek 6.27: Závislost výstupního výkonu Pout na nastaveném stejnosměrném pracovním bodu DC bias při konstantní frekvenci.....	62
Obrázek 6.28: Porovnání průběhů modulačního (žlutý) a modulovaného (zelený) signálu při frekvenci 1 MHz a 20 MHz pro pracovní oblast modulátoru.....	63
Obrázek 6.29: Naměřené hodnoty rozdílu nejnižší úrovně signálu od nulového potenciálu pro frekvenci 1 MHz a teploty 25°C a 70°C.....	64
Obrázek 6.30: Naměřené hodnoty rozdílu nejnižší úrovně signálu od nulového potenciálu pro frekvenci 10 MHz a teploty 25°C a 70°C.....	65
Obrázek 6.31: Naměřené hodnoty rozdílu nejnižší úrovně signálu od nulového potenciálu pro frekvenci 20 MHz a teploty 25°C a 70°C.....	65

## 10 Přílohy

### Seznam příloh

Příloha A: Tabulky naměřených hodnot pro statické charakteristiky modulátoru.....	2
Příloha B: Naměřené grafy pro statické charakteristiky modulátoru.....	7
Příloha C: Tabulky naměřených hodnot teplotní závislosti pro pracovní oblast modulátoru.....	12

Pozn: Veškeré naměřené průběhy z osciloskopu nejsou z důvodu velikosti obsahu součástí práce a jsou proto uloženy v externím souboru s názvem Priloha\_Grafy.ZIP, který byl přiložen spolu s prací.

*Příloha A: Tabulky naměřených hodnot pro statické charakteristiky modulátoru*

Měření 1			Měření 2			Měření 3		
U BIAS [V]	Pout[uW]	Udet[mV]	U BIAS [V]	Pout[uW]	Udet[V]	U BIAS [V]	Pout[uW]	Udet[V]
-7	168,9	835,7	-7	115,4	975,7	-7	134,2	934,6
-6,5	265,6	735,5	-6,5	164,4	897,4	-6,5	218,2	817,7
-6	365,4	619,6	-6	228,1	802,9	-6	309,8	689,2
-5,5	466,6	506,24	-5,5	302,1	696	-5,5	398,4	558,4
-5	560,5	398,52	-5	373,9	592,4	-5	489,7	430,55
-4,5	639,4	304,57	-4,5	449,3	484,2	-4,5	562,5	327,15
-4	695,6	238,77	-4	257,5	373,61	-4	621,2	243,12
-3,5	728,8	197,12	-3,5	587,4	286,18	-3,5	656,1	192,37
-3	734,5	187,26	-3	634,9	220,68	-3	666,3	174,23
-2,5	709,1	208,44	-2,5	663,7	182,28	-2,5	658,7	188,55
-2	660,2	255,18	-2	671,9	174,33	-2	627,9	234,12
-1,5	594,9	337,05	-1,5	658,7	196,27	-1,5	574,4	310,78
-1	509,7	430,75	-1	623,8	248,11	-1	496,4	415,3
-0,5	416,2	535,2	-0,5	567,5	328,86	-0,5	414,9	541,8
0	319,8	642,3	0	495,5	435,01	0	326,1	664,3
0,5	227,6	746,8	0,5	415,5	549,17	0,5	242,2	786,7
1	143,6	845,1	1	327,4	686,7	1	164,7	899,9
1,5	78,25	925,7	1,5	223,1	822,8	1,5	96,15	995,9
2	31,64	985,2	2	148,2	928,5	2	47,26	1065,6
2,5	6,628	1022,1	2,5	84,33	1018,4	2,5	15,26	1109,2
3	5,123	1032,8	3	37,63	1084,6	3	3,628	1127,8
3,5	26,49	1015,4	3,5	9,14	1120,3	3,5	12,37	1113,4
4	67,95	973,7	4	4,866	1125,2	4	40,75	1072,6
4,5	131,1	905,8	4,5	25,29	1094,4	4,5	85,15	1007,1
5	205,7	824,5	5	68,95	1027,1	5	143,4	922,7
5,5	288,9	738,4	5,5	134,1	932,1	5,5	208,1	828,3
6	376,4	632,9	6	213,4	823,6	6	281,8	722,4
6,5	460,9	553,3	6,5	306,6	684,2	6,5	351,3	621,7
7	539,9	464,5	7	392,4	563,1	7	405,9	532,4

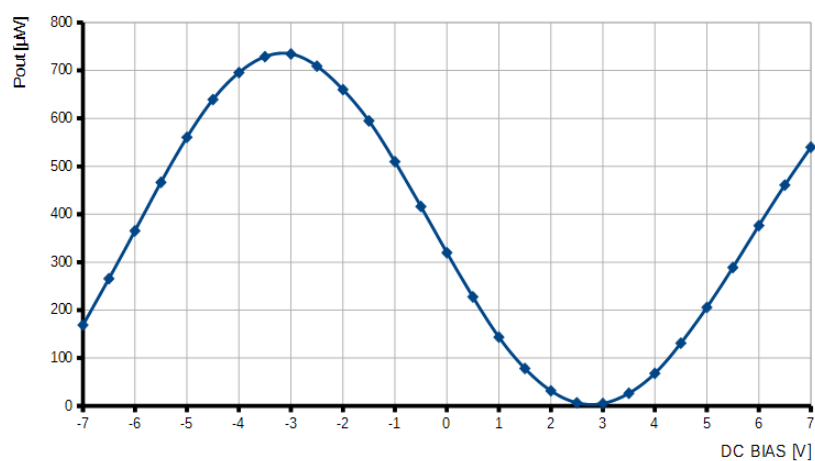
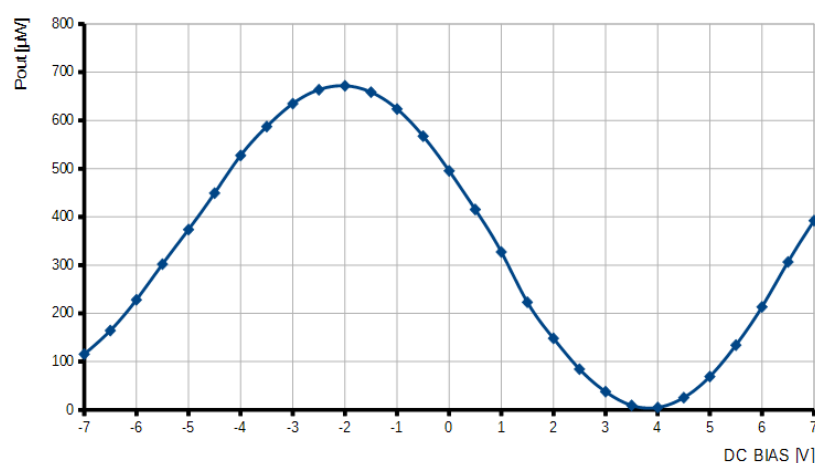
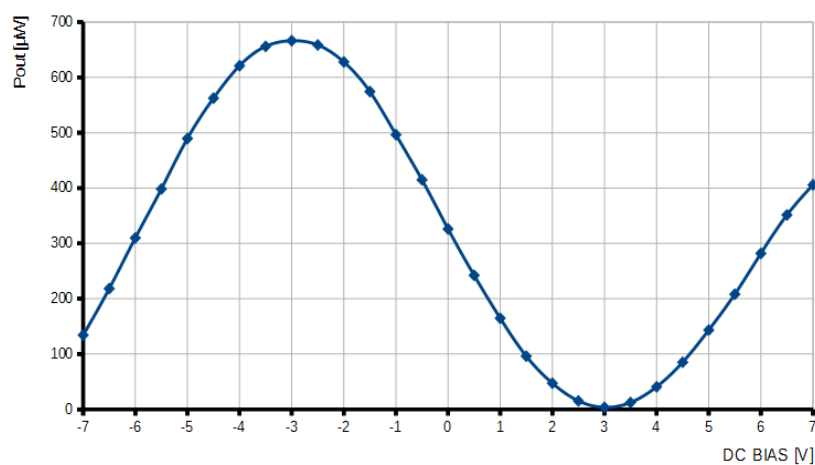
Měření 4			Měření 5			Měření 6		
U BIAS [V]	Pout[uW]	Udet[V]	U BIAS [V]	Pout[uW]	Udet[V]	U BIAS [V]	Pout[uW]	Udet[V]
-7	144,5	948,4	-7	146,2	927,4	-7	47,68	1072,7
-6,5	232,1	855,7	-6,5	223,4	814,1	-6,5	110,7	1007,3
-6	294,8	769,5	-6	323,8	667,2	-6	195,5	847,5
-5,5	380,8	651,3	-5,5	403,3	556,3	-5,5	304,1	661,1
-5	465,3	540,8	-5	495,7	425,54	-5	421,6	503,7
-4,5	549,7	412,71	-4,5	567,1	323,98	-4,5	547,8	335,1
-4	627,8	324,96	-4	623,9	243,57	-4	673,8	203,7
-3,5	688,3	254,74	-3,5	659,7	192,8	-3,5	786,8	173,7
-3	732,2	181,47	-3	671,1	174,83	-3	878,1	154,8
-2,5	754,5	176,57	-2,5	660,7	191,24	-2,5	947,3	111,1
-2	752,4	180,47	-2	626,3	214,25	-2	980,2	99,9
-1,5	727,7	187,45	-1,5	571,4	318,12	-1,5	976,4	101,7
-1	677,2	198,23	-1	501,7	418,72	-1	940,4	117,6
-0,5	611,3	213,47	-0,5	422,4	535,5	-0,5	869,6	157,8
0	528,9	389,15	0	333,3	660,9	0	766,3	186,1
0,5	433,4	532,3	0,5	247,8	781,9	0,5	645,8	257,7
1	335,4	638,4	1	168,9	894,2	1	512,8	427,9
1,5	237,7	771,4	1,5	101,1	990,4	1,5	372,4	694,7
2	152,1	907,9	2	49,77	1060,5	2	252,4	814,2
2,5	79,63	1011,4	2,5	16,63	1108,4	2,5	146,9	924,7
3	30,37	1077,8	3	3,515	1126,6	3	63,93	1031,7
3,5	5,35	1124,6	3,5	10,53	1118,4	3,5	16,43	1089,4
4	7,62	1101,7	4	36,78	1076,8	4	3,224	1128,8
4,5	36,46	1068,1	4,5	80,95	1014,6	4,5	26,87	1054,9
5	91,42	998,4	5	140,1	930,7	5	85,62	1012,7
5,5	170,2	862,7	5,5	204,2	836,4	5,5	177,3	912,4
6	260,9	715,5	6	282,3	727,6	6	287,1	735,7
6,5	365,4	609,4	6,5	353,7	622,8	6,5	415,8	534,9
7	465,8	532,4	7	418,7	532,9	7	554,2	387,6

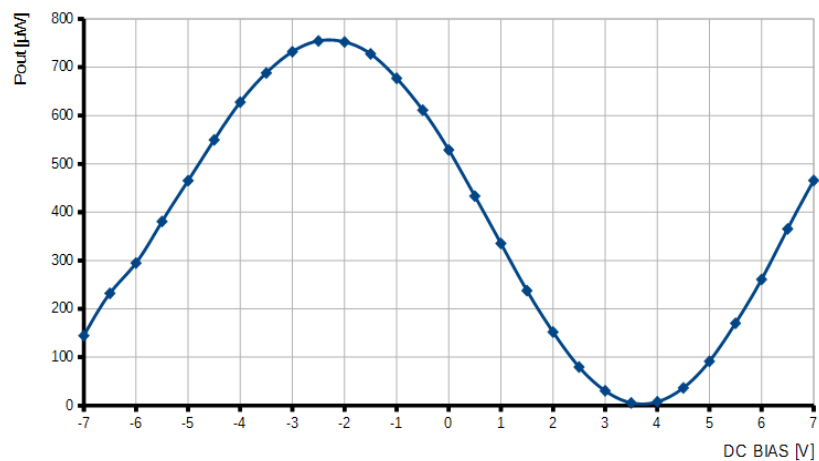
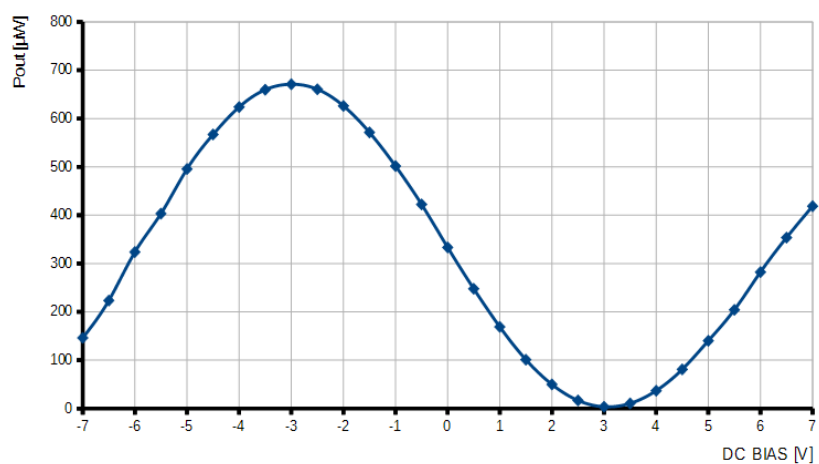
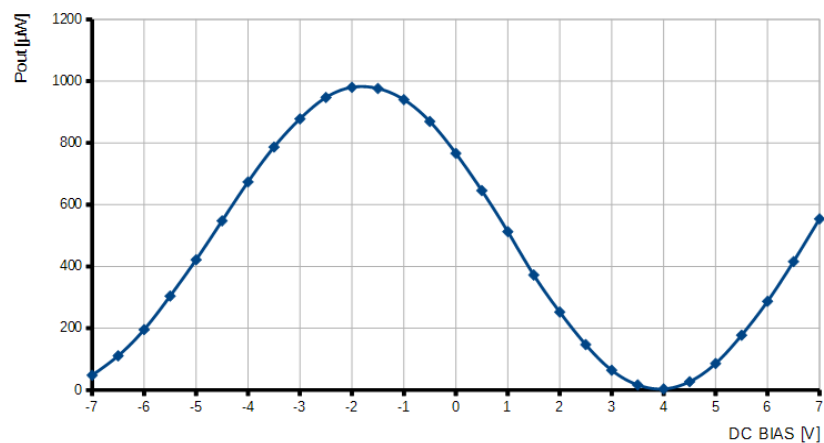
Měření 7			Měření 8			Měření 9		
U BIAS [V]	Pout[uW]	Udet[V]	U BIAS [V]	Pout[uW]	Udet[V]	U BIAS [V]	Pout[uW]	Udet[V]
-7	162,1	930,4	-7	150,7	925,2	-7	130,7	953,1
-6,5	211,9	854,8	-6,5	234,4	807,5	-6,5	191,7	867,3
-6	275,7	762,4	-6	326,3	671,2	-6	258,1	767,9
-5,5	351,5	647,1	-5,5	424,8	532,7	-5,5	333,3	658,2
-5	431,4	533,9	-5	511,9	408,65	-5	410,6	545,8
-4,5	503,8	428,64	-4,5	581,8	307,29	-4,5	482,9	443,24
-4	569,6	335,27	-4	632,2	232,87	-4	555,8	341,31
-3,5	622,9	259,62	-3,5	667,3	186,42	-3,5	611,9	262,33
-3	659,6	206,41	-3	674,8	174,1	-3	651,7	205,97
-2,5	679,1	178,15	-2,5	661,7	197,15	-2,5	673,6	176,51
-2	679,6	181,77	-2	621,6	254,38	-2	674,5	176,94
-1,5	657,3	213,12	-1,5	564,6	337,18	-1,5	655,4	206,23
-1	615,8	274,18	-1	490,2	445,26	-1	615,1	267,98
-0,5	556,1	360,88	-0,5	405,3	566,1	-0,5	556,3	351,18
0	482,8	466,81	0	321,8	690,3	0	485,1	455,85
0,5	397,8	587,5	0,5	237,7	811,2	0,5	401,3	575,2
1	310,3	711,3	1	156,9	928,5	1	314,2	700,4
1,5	225,4	833,7	1,5	93,01	1016,2	1,5	227,6	822,5
2	145,3	942,1	2	40,7	1089,4	2	150,6	931,4
2,5	81,31	1032,3	2,5	12,29	1132,7	2,5	85,49	1023,2
3	32,05	1096,6	3	3,431	1143,1	3	37,02	1088,9
3,5	7,371	1129,6	3,5	15,32	1126,7	3,5	9,24	1125,8
4	4,284	1131,5	4	46,36	1082,6	4	4,252	1128,4
4,5	26,58	1097,2	4,5	94,7	1013,2	4,5	23,75	1097,8
5	70,88	1029,9	5	158,5	920,4	5	66,46	1033,4
5,5	134,4	936,5	5,5	229,7	818,9	5,5	133,4	936,6
6	210,9	825,7	6	308,6	703,2	6	204,8	830,7
6,5	304,6	691,2	6,5	381,9	602,1	6,5	295,8	701,4
7	392,5	561,7	7	450,8	500,1	7	384,1	573,2

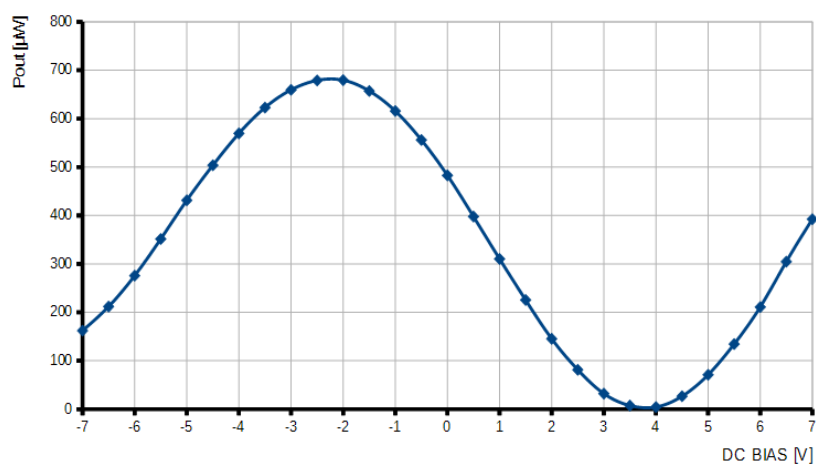
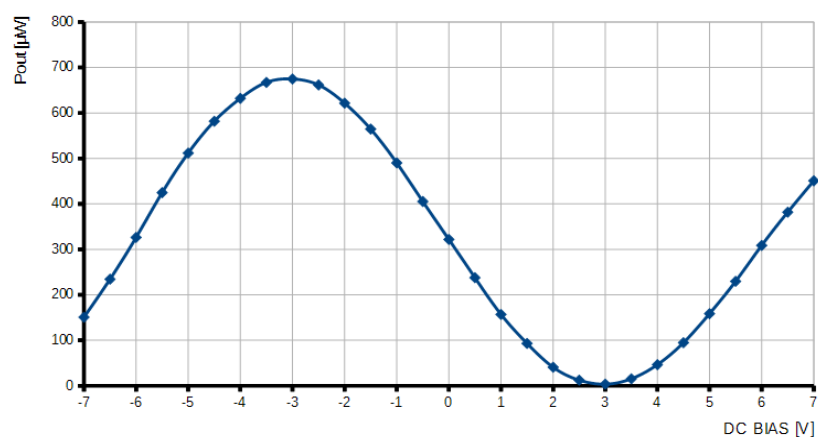
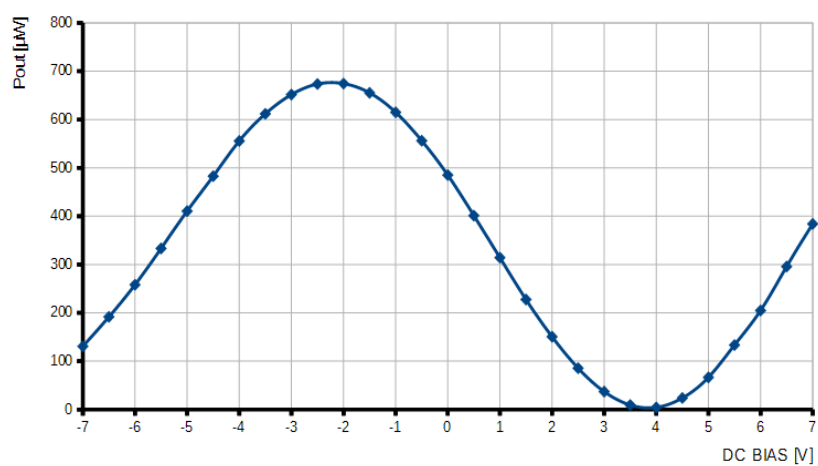


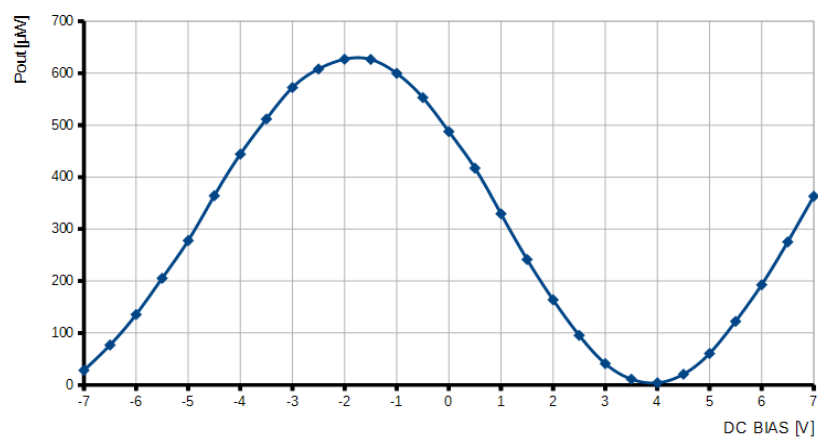
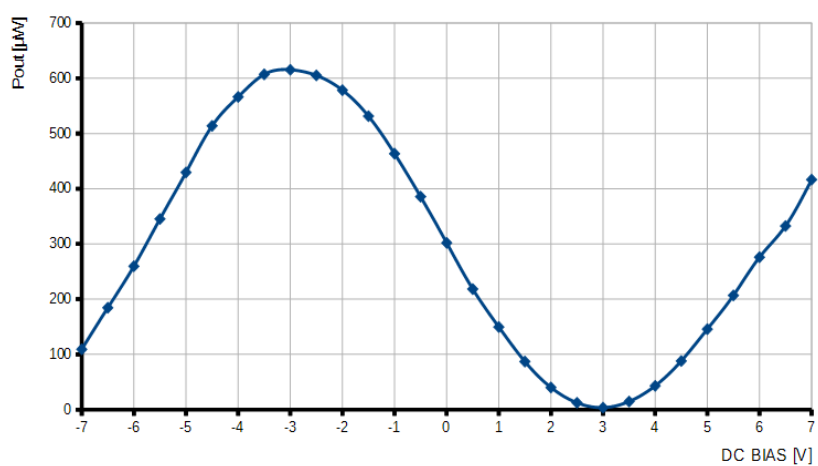
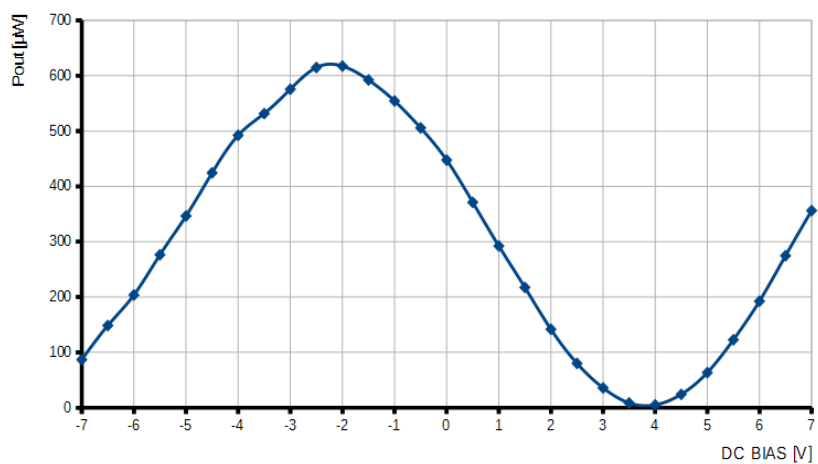
Měření 10			Měření 11			Měření 12		
U BIAS [V]	Pout[uW]	Udet[V]	U BIAS [V]	Pout[uW]	Udet[V]	U BIAS [V]	Pout[uW]	Udet[V]
-7	28,07	1023,4	-7	109,2	913,7	-7	86,82	936,7
-6,5	76,76	976,8	-6,5	184,5	801,2	-6,5	148,5	847,3
-6	135,4	901,7	-6	259,6	684,7	-6	203,7	761,9
-5,5	205,3	789,9	-5,5	345,2	554,1	-5,5	276,4	674,5
-5	277,8	684,9	-5	429,6	439,23	-5	346,5	556,8
-4,5	364,1	562,3	-4,5	513,8	327,35	-4,5	424,5	459,2
-4	444,2	447,37	-4	566,3	249,71	-4	492,4	366,8
-3,5	511,8	347,72	-3,5	607,1	203,25	-3,5	531,7	285,8
-3	572,4	267,35	-3	615,4	183,54	-3	575,6	225,5
-2,5	608,1	210,82	-2,5	605,2	197,18	-2,5	614,9	192,1
-2	626,9	184,68	-2	578,5	241,36	-2	617,5	186,8
-1,5	626,5	190,47	-1,5	531,4	313,78	-1,5	592,4	207,1
-1	599,7	226,22	-1	463,5	408,62	-1	554,4	256,1
-0,5	553,1	295,68	-0,5	385,6	517,3	-0,5	505,7	331
0	487,6	385,15	0	301,9	637,4	0	447,5	426,2
0,5	417,3	495,55	0,5	218,3	751,6	0,5	371,2	533,1
1	329,4	616,7	1	149,6	851,7	1	292,3	648,7
1,5	241,5	742,8	1,5	87,02	947,5	1,5	217,3	754,8
2	163,8	857,4	2	40,09	1012,3	2	141,7	854,4
2,5	95,4	953,4	2,5	12,38	1057,4	2,5	80,01	951,2
3	40,98	1020,1	3	3,587	1070,6	3	35,75	1010,3
3,5	11,13	1062,8	3,5	14,68	1048,4	3,5	8,507	1053,7
4	3,974	1071,4	4	43,02	1010,9	4	5,041	1063,7
4,5	20,55	1038,6	4,5	88,02	943,6	4,5	24,21	1031,6
5	60,45	981,9	5	145,7	857,7	5	63,41	957,1
5,5	122,3	892,9	5,5	206,8	772,2	5,5	122,8	871,3
6	192,7	787,3	6	275,9	673,4	6	192,5	765,1
6,5	275,2	676,2	6,5	332,5	592,3	6,5	274,7	653,4
7	363,2	546,8	7	416,4	475,2	7	356,2	531,2

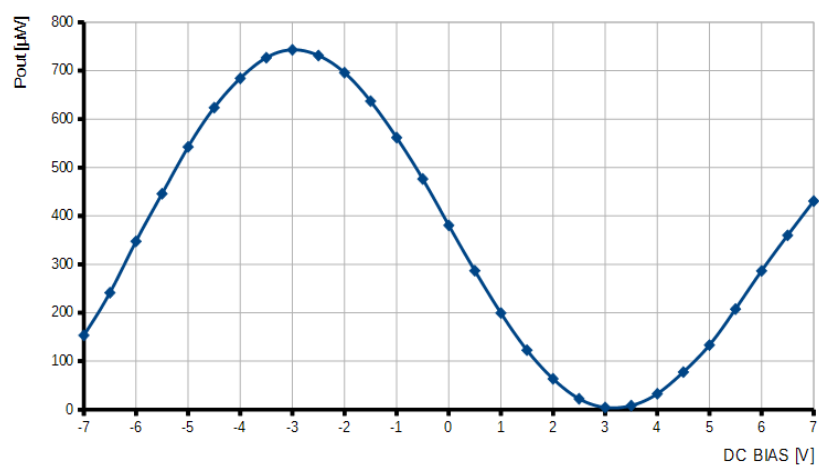
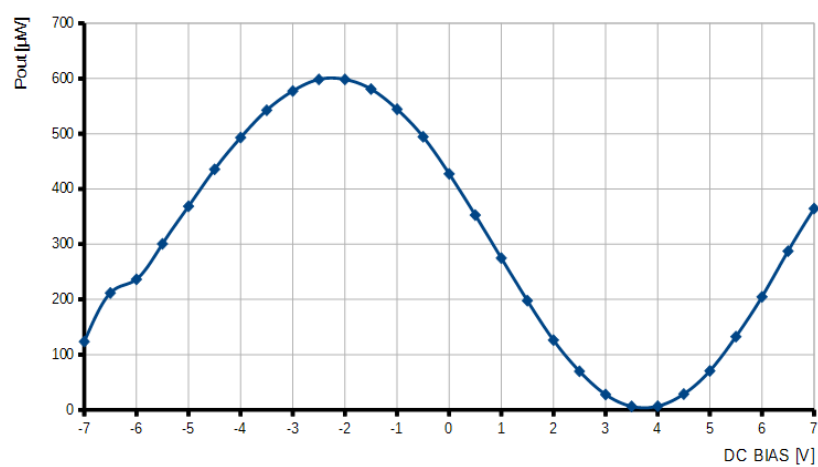
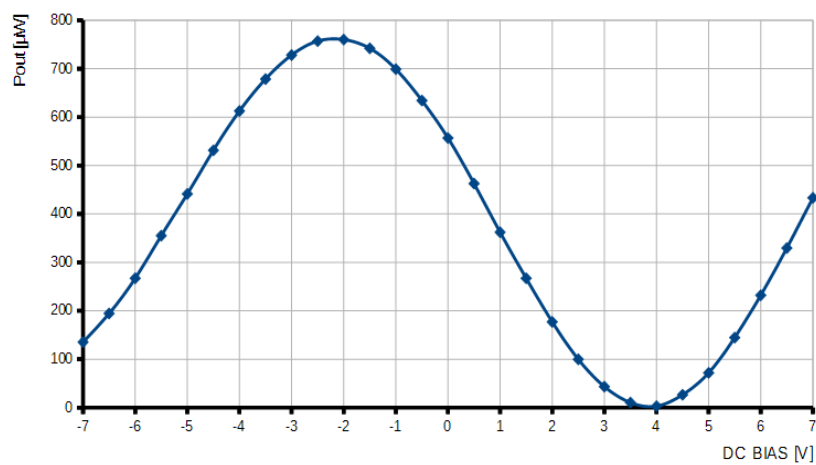
Měření 13			Měření 14			Měření 15		
U BIAS [V]	Pout[uW]	Udet[V]	U BIAS [V]	Pout[uW]	Udet[V]	U BIAS [V]	Pout[uW]	Udet[V]
-7	153,3	1002,4	-7	123,6	883,2	-7	135,3	1059,1
-6,5	241,4	878,1	-6,5	211,7	760,5	-6,5	194,5	971,8
-6	347,5	728,2	-6	236,4	713,5	-6	267,1	865,3
-5,5	445,9	586,2	-5,5	300,6	621,5	-5,5	355,2	737,8
-5	542,6	449,76	-5	368,6	522,7	-5	441,4	612,3
-4,5	623,7	328,95	-4,5	435,6	426,12	-4,5	531,5	485,1
-4	684,3	241,14	-4	493,1	341,02	-4	612,7	368,74
-3,5	726,9	183,77	-3,5	542,6	268,46	-3,5	678,7	275,91
-3	743,2	161,56	-3	577,4	217,91	-3	728,3	205,35
-2,5	731,4	178,65	-2,5	598,4	190,84	-2,5	757,1	166,82
-2	696	230,52	-2	598,4	190,35	-2	760,2	161,57
-1,5	637,1	315,28	-1,5	580,9	216,72	-1,5	742,2	190,23
-1	561,9	426,18	-1	544,4	269,65	-1	699,1	253,92
-0,5	476,4	550,8	-0,5	494,5	343,44	-0,5	634,4	344,18
0	380,6	687,2	0	427,4	440,38	0	556,9	462,26
0,5	286,9	823,7	0,5	352,7	549,3	0,5	462,8	595,5
1	199,4	948,7	1	274,8	658,7	1	362,3	735,2
1,5	122,7	1058,4	1,5	197,8	771,8	1,5	267,2	871,6
2	63,55	1141,1	2	126,3	869,4	2	177,1	996,3
2,5	22,25	1204,4	2,5	69,82	948,4	2,5	99,8	1105,5
3	4,444	1226,9	3	27,87	1006,7	3	43,45	1182,7
3,5	8,193	1221,8	3,5	6,304	1034,7	3,5	10,42	1222,9
4	32,62	1185,3	4	6,629	1030,6	4	3,091	1230,4
4,5	77,54	1121,6	4,5	28,62	997,4	4,5	26,57	1192,7
5	133,2	1040,3	5	70,5	933,7	5	71,82	1123,4
5,5	207,6	934,5	5,5	132,6	846,1	5,5	144,7	1019,6
6	286,5	818,2	6	204,7	739,1	6	232,1	887,6
6,5	359,9	712,2	6,5	287,4	621,8	6,5	329,6	750,4
7	430,7	601,4	7	364,5	510,4	7	433,5	596,7

*Příloha B: Naměřené grafy pro statické charakteristiky modulátoru*Závislost výstupního výkonu  $P_{out}$  na stejnosměrném napětí DC bias - Měření 1Závislost výstupního výkonu  $P_{out}$  na stejnosměrném napětí DC bias - Měření 2Závislost výstupního výkonu  $P_{out}$  na stejnosměrném napětí DC bias - Měření 3

Závislost výstupního výkonu  $P_{out}$  na stejnosměrném napětí DC bias - Měření 4Závislost výstupního výkonu  $P_{out}$  na stejnosměrném napětí DC bias - Měření 5Závislost výstupního výkonu  $P_{out}$  na stejnosměrném napětí DC bias - Měření 6

Závislost výstupního výkonu  $P_{out}$  na stejnosměrném napětí DC bias - Měření 7Závislost výstupního výkonu  $P_{out}$  na stejnosměrném napětí DC bias - Měření 8Závislost výstupního výkonu  $P_{out}$  na stejnosměrném napětí DC bias - Měření 9

Závislost výstupního výkonu  $P_{out}$  na stejnosměrném napětí DC bias - Měření 10Závislost výstupního výkonu  $P_{out}$  na stejnosměrném napětí DC bias - Měření 11Závislost výstupního výkonu  $P_{out}$  na stejnosměrném napětí DC bias - Měření 12

Závislost výstupního výkonu  $P_{out}$  na stejnosměrném napětí DC bias - Měření 13Závislost výstupního výkonu  $P_{out}$  na stejnosměrném napětí DC bias - Měření 14Závislost výstupního výkonu  $P_{out}$  na stejnosměrném napětí DC bias - Měření 15

## Příloha C: Tabulky naměřených hodnot teplotní závislosti pro pracovní oblast modulátoru

Měření 1						
U BIAS [V]	Teplota 25 stupnu Pout [uW]	Teplota 30 stupnu Pout [uW]	Teplota 40 stupnu Pout [uW]	Teplota 50 stupnu Pout [uW]	Teplota 60 stupnu Pout [uW]	Teplota 70 stupnu Pout [uW]
-2,5	815,9	809,6	809,7	795,3	759,9	747,7
-1	689,7	661,6	660,8	662,2	624,5	597,7
0,5	414,5	376,6	374,2	365,1	318,4	276,5
2	136,2	102,2	98,8	73,21	43,08	31,38
3,5	3,742	4,866	7,516	19,71	38,74	56,58
Měření 2						
3,5	3,172	4,295	5,307	10,7	34,91	53,45
2	102,8	81,03	67,73	45,82	26,51	32,49
0,5	359,7	327,4	310,2	279,2	248,9	279,8
-1	649,9	628,3	624,5	601,2	579,8	603,3
-2,5	815,1	809,2	812,6	789,8	751,9	742,9
Měření 3						
U BIAS [V]	Teplota 25 stupnu Pout [uW]	Teplota 30 stupnu Pout [uW]	Teplota 40 stupnu Pout [uW]	Teplota 50 stupnu Pout [uW]	Teplota 60 stupnu Pout [uW]	Teplota 70 stupnu Pout [uW]
-2,5	816,6	811,4	814,2	793,5	760,7	769,7
-1	682,8	667,5	676,3	662,5	619,4	617,6
0,5	409,3	387,3	389,5	364,9	302,1	286,1
2	132,3	115,3	108,7	74,03	46,05	33,56
3,5	3,473	3,257	4,626	22,76	41,23	49,71
Měření 4						
3,5	3,189	3,245	3,588	13,57	37,82	50,53
2	104,2	95,24	75,56	43,89	27,35	32,21
0,5	360,7	348,9	315,3	278,9	257,8	290,6
-1	651,4	646,8	621,3	603,1	585,3	618,4
-2,5	818,5	817,1	801,7	794,3	755,2	765,5
Měření 5						
U BIAS [V]	Teplota 25 stupnu Pout [uW]	Teplota 30 stupnu Pout [uW]	Teplota 40 stupnu Pout [uW]	Teplota 50 stupnu Pout [uW]	Teplota 60 stupnu Pout [uW]	Teplota 70 stupnu Pout [uW]
-2,5	815,4	826,7	820,4	842,3	806,1	723,8
-1	636,9	613,5	604,2	657,5	642,2	565,5
0,5	341,4	305,6	292,7	326,4	301,1	242,5
2	80,55	59,08	49,65	53,11	31,76	22,25
3,5	7,801	16,67	26,51	33,77	65,78	68,33
Měření 6						
3,5	8,706	21,88	15,45	24,47	26,58	53,78
2	59,61	36,78	39,72	25,24	16,17	15,14
0,5	285,9	250,5	259,5	242,7	238,9	233,5
-1	584,8	567,8	587,3	596,1	604,5	554,1
-2,5	799,9	817,8	834,5	847,2	794,7	741,1
Měření 7						
U BIAS [V]	Teplota 25 stupnu Pout [uW]	Teplota 30 stupnu Pout [uW]	Teplota 40 stupnu Pout [uW]	Teplota 50 stupnu Pout [uW]	Teplota 60 stupnu Pout [uW]	Teplota 70 stupnu Pout [uW]
-2,5	801,4	831,8	840,5	842,2	771,6	732,7
-1	616,3	629,6	647,1	663,3	603,3	572,4
0,5	324	322,3	332,4	327,7	278,7	249,7
2	75,87	68,55	64,02	56,64	29,08	22,59
3,5	8,16	12,15	17,31	37,25	48,99	64,13
Měření 8						
3,5	8,412	9,706	11,25	24,78	44,62	57,63
2	57,14	55,12	45,61	27,32	15,69	18,15
0,5	280,5	282,9	271,6	245,7	222,2	239,4
-1	583,3	600,7	608,5	604,2	549,7	558,5
-2,5	801,2	829,9	846,8	844,8	758,2	735,5



Měření 9						
U BIAS [V]	Teplota 25 stupnu Pout [uW]	Teplota 30 stupnu Pout [uW]	Teplota 40 stupnu Pout [uW]	Teplota 50 stupnu Pout [uW]	Teplota 60 stupnu Pout [uW]	Teplota 70 stupnu Pout [uW]
-2,5	809,4	795,6	776,7	772,5	779,1	738,4
-1	677,7	647,1	629,5	629,3	627,2	577,7
0,5	365	359,2	336,7	323,6	301,4	257,4
2	78,14	78,34	70,59	56,27	38,42	27,32
3,5	9,627	13,58	15,62	27,62	42,47	58,18
Měření 10						
3,5	8,237	9,537	16,27	30,14	45,62	61,74
2	51,12	52,52	40,21	30,41	19,63	18,51
0,5	297,5	287,6	261,7	264,7	253,9	239,1
-1	622,1	610,8	586,1	586,7	594,5	562,2
-2,5	806,9	794,9	783,4	777,2	782,4	735,9

Měření 11						
U BIAS [V]	Teplota 25 stupnu Pout [uW]	Teplota 30 stupnu Pout [uW]	Teplota 40 stupnu Pout [uW]	Teplota 50 stupnu Pout [uW]	Teplota 60 stupnu Pout [uW]	Teplota 70 stupnu Pout [uW]
-2,5	810,1	800,4	786,7	796,2	742,4	735,6
-1	674,6	656,4	644,6	643,7	592,2	569,4
0,5	365,7	357,7	342,4	337,4	273,3	247,1
2	82,52	81,34	78,56	56,58	34,84	23,47
3,5	12,691	11,27	14,57	28,64	40,11	61,19
Měření 12						
3,5	7,099	16,57	16,01	32,74	44,43	67,41
2	59,61	50,33	43,78	35,79	20,57	20,35
0,5	300,4	272,2	269,3	263,2	249,4	244
-1	620,1	602,7	593,4	624,7	562,4	565,6
-2,5	806,7	799,1	785,9	792,4	745,6	737,8